

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra robototechniky**

**Pohon kola vícekolového mobilního robotu**

**Wheel Drive of a Multi-Wheel Mobile Robot**

**Diplomant:**

**Bc. Lukáš Kušnír**

**Vedoucí diplomové práce:**

**prof. Dr. Ing. Vladimír Mostýn**

**Ostrava 2013**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Kušnír**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T013 Robotika  
Téma: **Pohon kola vícekolového mobilního robotu**  
**Wheel Drive of a Multi-Wheel Mobile Robot**

### Zásady pro vypracování:

1. Navrhněte integrovaný pohon kola pro vícekolový podvozek s funkcí umožňující odpojení pohonu při jeho poruše, aby pohon kola v poruše nebránil pohybu celého robotu. Zohledněte spolehlivost, robustnost a dobrou účinnost pohonu.
2. Navrhněte varianty řešení integrovaného pohonu z hlediska použití pohonu v kole a mimo kolo robotu, dále z hlediska použitých pohonů, typů převodů a možností rozpojení pohybu.
3. Vybrané koncepční řešení rozpracujte do úrovně detailního 3D modelu a podkladů pro výrobu.
4. Práci doplňte podrobnou technickou dokumentací. Výkresovou dokumentaci vypracujte dle pokynů vedoucího práce.
5. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD a konstrukční řešení v CAD systému (podle pokynů vedoucího).

### Seznam doporučené odborné literatury:

1. Nourbakhsh, I., Siegwart, R. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 2004. 321 pp. ISBN 0-262-19502-X. Dostupné z:  
[http://www.ee.ui.ac.id/muis/course\\_file/robotics/Introduction\\_to\\_Autonomous\\_Mobile\\_Robots.pdf](http://www.ee.ui.ac.id/muis/course_file/robotics/Introduction_to_Autonomous_Mobile_Robots.pdf)
2. Kárník, L. *Servisní roboty*. 1. vydání. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 144 s. ISBN 80-248-0626-6.
3. Skařupa, J. – Mostýn, V. *Teorie průmyslových robotů*. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2000. 146 s. ISBN 80-88922-35-6.
4. Skařupa, J. – Mostýn, V. *Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů*. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2002. 190 s. ISBN 80-88922-55-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr.Ing. Vladimír Mostýn**


Datum zadání: 31.10.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



---

prof. Dr.Ing. Petr Novák  
vedoucí katedry



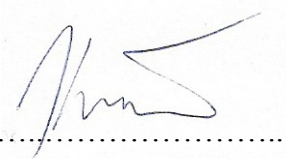
---

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 20. 5. 2013

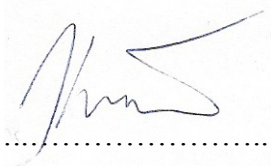


.....  
**Bc. Lukáš Kušnír**

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20. 5. 2013



.....  
**Bc. Lukáš Kušnír**

Jméno a příjmení autora práce:

**Bc. Lukáš Kušnír**

Adresa trvalého pobytu autora práce:

**Nádražní, 222  
747 22 Dolní Benešov**

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KUŠNÍR, L. *Pohon kola vícekolového mobilního robotu: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky, 2013, 73s. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Vladimír Mostýn

Diplomová práce se zabývá návrhem integrovaného pohonu kola vícekolového mobilního robotu. Úvodní část popisuje stávající koncepce pohonů kol a v současnosti vyráběná kola. Pro vlastní konstrukci pohonu jsou specifikovány požadavky a popsány vhodné komponenty. Poté jsou zpracovány tři varianty řešení pohonu s jejich popisy. Na základě provedení hodnotové analýzy je vybrána optimální varianta řešení. Vybraná varianta je dále podrobněji popsána a rozpracována do úrovně detailního 3D modelu. Je doložena výpočtovou zprávou a podrobnou technickou dokumentací. V závěru je celá práce zhodnocena a doložena přílohami.

## ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

KUŠNÍR, L. *Wheel Drive of a Multi-Wheel Mobile Robot: Diploma Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2013, 73p. Thesis head: prof. Dr. Ing. Vladimír Mostýn

The thesis deals with the design of an integrated multi-wheel drive of a mobile robot. The first section describes existing approaches to drive of the wheels and currently produced wheels. Power requirements are specified and suitable components described for the specific design. Three options of solution of the drive are then processed with their descriptions. Based on the design value analysis the optimal solution was selected. The chosen option is further described and elaborated to the level of detailed 3D model. It is supported by a calculation report and detailed technical documentation. At the end the thesis is evaluated and supported by supplements.

## Obsah diplomové práce

Seznam použitých značek a symbolů .....	8
Úvod.....	10
1     Analýza stávajících koncepcí pohonů kol u vozidel .....	11
1.1     Klasická koncepce pohonu, spalovací motor .....	11
1.2     Koncepce s použitím motoru a elektromotoru s akumulátorem.....	12
1.3     Koncepce s použitím elektromotorů v kolech .....	13
2     Současní výrobci pohonů umístěných v kolech .....	14
2.1     Robotická vozidla NASA .....	14
2.2     Volvo ReCharge Concept.....	16
2.3     Michelin Active Wheel.....	17
2.4     Protean Drive.....	18
2.5     Hub motory.....	19
3     Požadavky pro konstrukci vlastního pohonu kola .....	20
4     Popis pohonu integrovaného v náboji kola .....	21
4.1     Použité elektromotory .....	21
4.2     Komponenty pro odpojení pohonu od kola .....	23
4.3     Komponenty potřebné k zabrzdění kola.....	24
5     Koncepční varianty řešení pohonu v náboji kola.....	26
5.1     Varianta A .....	26
5.2     Varianta B.....	27
5.3     Varianta C.....	29
6     Výběr optimální varianty – hodnotová analýza .....	31
6.1     Hodnoty jednotlivých kritérií .....	31
6.2     Charakteristika hodnotících kritérií .....	31
6.3     Významnost kritérií .....	32
6.4     Vážený index kritéria .....	32

6.5	Součet vážených indexů a stanovení pořadí variant.....	33
6.6	Celkové zhodnocení kapitoly .....	33
7	Konstrukční řešení optimální varianty .....	34
7.1	Popis základních součástí pohonu .....	34
7.2	Bezrámový motor (frameless motor).....	35
7.3	Spojka .....	37
7.4	Brzda.....	40
7.5	Nosná konstrukce částí pohonu .....	43
7.6	Montáž pohonu .....	44
7.7	Řešení potřebná pro bezpečné fungování pohonu .....	47
7.8	Možnosti, čím se dále zabývat při řešení pohonu.....	48
7.9	Pohon kola umístěný v náboji kola .....	49
8	Výpočet a kontrola vybraných částí pohonu .....	50
8.1	Hmotnost a síly působící na pohon .....	50
8.2	Metodika návrhu pohonu.....	50
8.3	Pohon pro použití automobil .....	55
8.4	Pohon pro použití v 900 kg, šestikolovém robotu .....	57
8.5	Pohon pro použití v 300 kg, čtyřkolovém, robotu.....	59
8.6	Kontrola spojky .....	60
8.7	Výpočet parametrů kotoučové brzdy.....	61
8.8	Kontrola drážkování .....	62
8.9	Kontrola ložiska.....	62
8.10	Deformační analýza krytu brzdy.....	65
9	Závěr .....	67
10	Seznam použité literatury .....	68
11	Seznam příloh.....	71



## Seznam použitých značek a symbolů

značka	popis	jednotka
$a$	zrychlení soustavy	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$a_{v\max}$	maximální zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$d$	průměr hřídele drážkování	$\text{m}$
$d'$	minimální průměr hřídele drážkování	$\text{m}$
$e$	excentricita radiální reakce terénu	$\text{m}$
$F_H$	hnací síla	$\text{N}$
$f_k$	součinitel valivého odporu kola	-
$f_U$	součinitel účinnosti spojky	-
$F_1$	síla vzniklá působením hmotnosti robotu	$\text{N}$
$FR_a$	reakce působící na ložiska	$\text{N}$
$FR_b$	reakce působící na ložiska	$\text{N}$
$F_{K_j}$	síla jednoho hnacího kola	$\text{N}$
$F_O$	odstředivá síla	$\text{N}$
$F_{Sk}$	síla sklíčidla vyvinutá na určitou plochu	$\text{N} \cdot \text{cm}^{-2}$
$F_U$	upínací síla sklíčidla	$\text{N}$
$F_{Ut}$	tečná upínací síla	$\text{N}$
$G$	celková tíha působící na kolo	$\text{N}$
$g$	tíhové zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$J$	moment setrvačnosti rotujících hmot	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
$l$	potřebná délka drážkování	$\text{m}$
$l'$	minimální délka drážkování	$\text{m}$
$m$	hmotnost	$\text{kg}$
$M_B$	moment, který brzda ubrzdí	$\text{N} \cdot \text{m}$
$M_{f_k}$	moment působící proti otáčení kola	$\text{N} \cdot \text{m}$
$M_H$	hnací moment působící na jedno kolo	$\text{N} \cdot \text{m}$
$M_K$	krouticí moment kola	$\text{N} \cdot \text{m}$
$M_{msk}$	skutečný moment motoru	$\text{N} \cdot \text{m}$
$M_S$	maximální moment, který spojka přenes	$\text{N} \cdot \text{m}$
$M_{sk}$	skutečný krouticí moment	$\text{N} \cdot \text{m}$
$n$	počet poháněných kol	-

$n_M$	jmenovité otáčky motoru	$\text{min}^{-1}$
$n_{\text{prům}}$	průměrné otáčky	$\text{min}^{-1}$
$O_f$	valivý odpor	N
$O_v$	vzdušný odpor	N
$O_s$	odpor stoupání	N
$O_z$	odpor zrychlení	N
P	potřebný výkon elektromotoru	W
p	tlak	Pa
$p_D$	maximální dovolený tlak	Pa
R	součet všech jízdních odporů působících proti směru jízdy	N
$R_a$	reakce na předním kole	N
$R_b$	reakce na zadních kolech	N
$S_{Sk}$	plocha ocelového disku sklíčidla	$\text{m}^2$
$r_K$	valivý poloměr kola	m
$r_{Ok}$	ocelového kotouče	m
$r_{Kb}$	poloměr brzdového kotouče	m
T	čas	s
$\Delta t$	změna času	s
$\Delta v$	změna rychlosti	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
q	váha významnosti	-
$Z_K$	radiální reakce podlahy	N
$\alpha$	úhel sklonu	°
$\tau_K$	napětí v krutu	MPa
$\tau_{DK}$	napětí v krutu dovolené	MPa
$\eta_p$	účinnost převodovky	-
$\vartheta$	součinitel vlivu rotačních částí zohledňujících odpor rotujících součástí pohonu	-

## Úvod

V minulosti byl pohon strojů a dopravních prostředků závislý převážně na tažných zvířatech. Obrat v tomto zavedeném systému nastal až v 18. a 19. století s příchodem průmyslové revoluce. Hlavním pohonem průmyslové revoluce byl parní stroj a ten se začal postupně objevovat ve všech průmyslových odvětvích. Nejvýznamnější pokrok díky němu, ovšem nastal v dopravě. S dalším rozvojem techniky souvisí vynalezení a zkonstruování prvního spalovacího motoru v druhé polovině 19. století. Zde nastal rozkvět automobilismu.

Počátkem 20. století se k automobilům poháněným spalovacím motorem přidaly také první elektromobily, které měli elektromotor integrovaný přímo v náboji kola. Na tento prakticky revoluční nápad se ovšem na poměrně dlouho dobu zapomnělo z důvodu nemožnosti skladování elektrického proudu. Od té doby byl spalovací motor s malými výjimkami výhradní pohonnou silou automobilů a podobných zařízení. Použití elektropohonu se proto přesunulo na železnici, kde elektřinu zajišťují troleje.

S rozvojem robotiky a v posledních letech zejména servisní robotiky a kladením stále větších nároků na ekologii, snížení hmotnosti a úsporu místa v automobilovém průmyslu přímo nabízí obnovení konceptu pohonu integrovaného v náboji samotného kola. Průkopníkem tohoto konceptu je NASA, která ho poprvé použila v měsíčním vozítku, později také v robotických vozítkách vyslaných na Mars.

Cílem této diplomové práce je konstrukční návrh pohonu kola vícekolového mobilního podvozku, který umožňuje odpojení kola od pohonu, aby pohon v poruše nebránil pohybu celého robotu. Dalším cílem je použití komponentů, brzdy a spojky s minimální energetickou náročností. První část práce se týká analýzy nyní dostupných pohonů integrovaných do kol automobilů a mobilních robotů. Dále jsou specifikovány požadavky pro konstrukci vlastního pohonu integrovaného do kola, zpracovaná řešení vhodných elektromotorů a ostatních potřebných komponent. Z vymodelovaných 3 variant řešení je pomocí hodnotové analýzy vybrána optimální varianta. Tato varianta je posléze podrobně rozpracována, popsána a doložena výpočty. V závěru je práce zhodnocena, je přiložen sestavný výkres, vybrané výrobní výkresy a přílohy.

# 1 Analýza stávajících koncepcí pohonů kol u vozidel

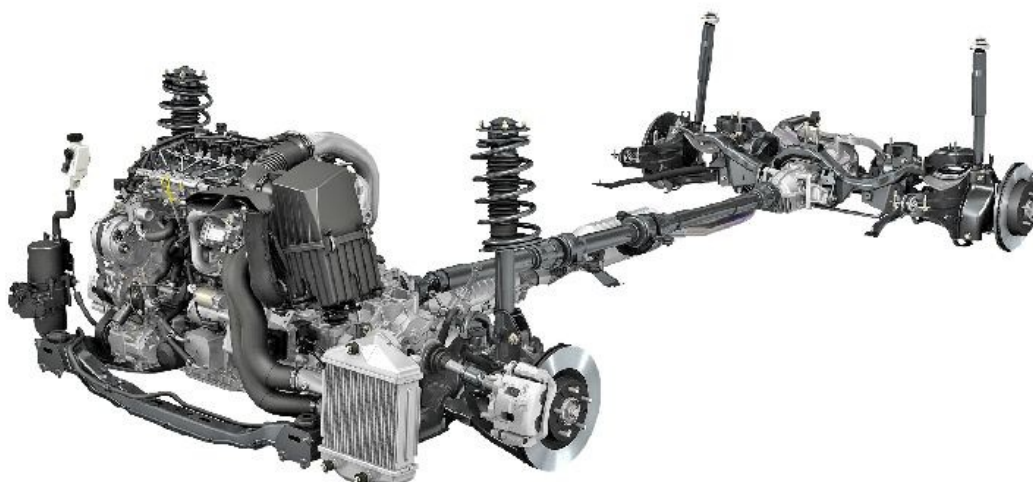
Pohon jako takový má více významů. Jedním ze základních účelů pohonu je uvedení stroje do pohybu. Ještě před průmyslovou revolucí a tím pádem před vynalezením parního stroje se pro pohon používala hlavně zvířata, která za sebou táhla povoz nebo jiný potřebný stroj. S příchodem parního stroje se významně rozšířili možnosti pohonů. Mezi kolovými stroji byly parním strojem poháněny lokomotivy a později také automobily. Po vynalezení motoru s vnitřním spalováním se tento motor stal jedním z nejčastějších systémů určených k pohonu vozidel. V dnešní době se pro pohon automobilů nejčastěji používá z historického hlediska klasická koncepce pohonu, která je složena z motoru, převodovky, přes kterou putuje otáčivý pohyb na jednotlivá kola vozidla. Tento typ je nejrozšířenější hlavně u automobilů, ale z důvodu nutnosti snižování emisí, které spalovací motor produkuje, se v posledních letech výrobci vozidel snaží zapojit do pohonů svých vozů také elektromotor. Ten se používá buď pro výpomoc spalovacímu motoru při akceleraci, nebo jeho náhrada při částečném, většinou ustáleném pohybu vozidla. Při instalaci elektromotoru do vozidla je potřeba pro něj uchovávat elektrickou energii. Z toho důvodu jsou ve vozidle instalovány baterie, které jsou dobíjeny ať už se zásuvky, kdy auto stojí v garáži, pomocí rekuperace kinetické energie nebo například přímo spalovacím motorem, který je v tomto případě generátorem. Znovu objevenou koncepcí pohonu je umístění elektromotoru přímo v náboji kola, kde je vypuštěn spalovací motor, klasická převodovka a ve vozidle jsou umístěny pouze baterie a v poháněných kolech jsou elektromotory. To vše je důsledek vývoje účinnějších elektromotorů, baterií, atd. Poslední zmiňovaná koncepce se už nějakou dobu nejvíce používá v robotice, pro pohon robotických vozítek. Zde je průkopníkem NASA, která tyto robotická vozítka vyslala na jiné planety.

V této kapitole se budu podrobněji zabývat jednotlivými koncepcemi pohonů, které jsou popsány výše, s ohledem na to, jak jsou využitelné pro pohon robotického vozítka. Snahou je získat co nejvíce informací o těchto pohonech a specifikovat požadavky pro vytvoření vlastního pohonu s možností integrace do kolového robotu.

## 1.1 Klasická koncepce pohonu, spalovací motor

Klasická koncepce pohonu kol u automobilu, kde je otáčivý pohyb vytvořený spalovacím motorem a přes převodovku, rozvodovku a diferenciál je dále distribuován na poháněná kola, ať už přední, zadní nebo všechna čtyři, je v současné době nejvíce

využívána. Je to z historie nejvíce odzkoušená koncepce, kde už ovšem není příliš velká možnost pro výrazné zlepšení. Zlepšení se provádějí pouze v nových technologiích výroby těchto vozidel a vylepšování materiálů použitých ke stavbě těchto vozidel. Vzhledem k energetické účinnosti spalovacího motoru, ztrátám v převodovce a dále v pohonném systému není klasická koncepce vhodná pro robotická vozítka, která by měla vykazovat co nejmenší spotřebu energie. Dále je potřeba poměrně mnoho prostoru pro zástavbu motoru, převodovky, diferenciálů a dalších důležitých součástí pohonu.



*Obrázek 1- Podvozek Mazdy CX-7 s klasickou koncepcí a pohonem 4x4 [7]*

## **1.2 Koncepce s použitím motoru a elektromotoru s akumulátorem**

Tato koncepce klasického uspořádání pohonu s přidáním elektromotoru a baterií se v dnešní době vlivem zvyšujících se cen paliva a vlivem nároků na snížení emisí dostala do popředí zájmu automobilek. Využívají více než jeden zdroj energie, tyto vozidla se pak nazývají hybridní. Je zde možnost několika konfigurací této koncepce pohonu. Ta úplně základní je, že se primárně o pohon stará spalovací motor a v případě vyššího zatížení se připojí elektromotor. Naopak při nízkém a ustáleném zatížení pohání automobil pouze elektromotor, který čerpá svou energii z baterií umístěných ve vozidle. U této konfigurace se baterie dobíjejí pomocí elektrické zásuvky, pomocí rekuperace kinetické energie při brzdění, při jízdě bez plynu slouží elektromotor jako dynamo, nebo např. pomocí solárního panelu umístěného na střeše vozidla. Umístění elektromotoru a akumulátoru se liší podle jednotlivých výrobců i v rámci jednotlivých vozidel od jednoho výrobce. Elektromotor je většinou pomocí spojky připojen přímo k převodovce a přes tu je krouticí moment

distribuován na kola, v některých případech je zakomponován uprostřed přední nebo zadní nápravy. [9]

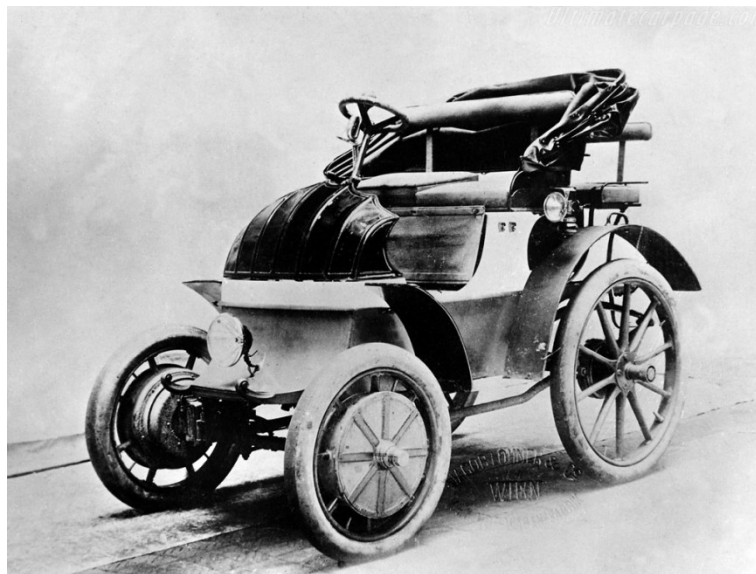


Obrázek 2 – Ukázka hybridní technologie u Audi Q5 [8]

### 1.3 Koncepce s použitím elektromotorů v kolech

Koncepce tohoto pohonu je z historického hlediska nejstarší a byla použita Ferdinandem Porsche už v roce 1900 v hybridním elektromobilu Lohner-Porsche Mixte Voiturette. Tento automobil využíval v různých konfiguracích dva nebo čtyři elektromotory umístěny přímo v kolech. Bohužel se na tento koncept po dlouhou dobu zapomnělo a ve vozidlech se opět začal více objevovat až v posledních letech. Průkopníkem této koncepce je NASA, ta jí začala rozvíjet kvůli použití vozidla pro rozsáhlejší průzkum měsíčních Apennin v roce 1970. Po dalším vylepšování a zmenšování pohonů nasadila NASA svá robotická vozítka s motory v kolech také na Marsu. Po velkém boomu hybridů a elektromobilů, který odstartovala Toyota v roce 1997 se svým modelem Prius, bylo potřeba posunout vývoj těchto vozidel kupředu. Z toho důvodu se různí výrobci vrátili ke koncepci ze začátku 20. stol. v podobě vozidla Lohner-Porsche Mixte Voiturette. Ať už se jednalo o automobilky, které představili své koncepty jako celá auta, mezi nimi např. Honda, Nissan a Volvo nebo o výrobce vyvíjející pouze pohon jako takový Michelin, Bridgestone, Siemens či Protean electric. Pohony umístěné v kolech mají ve vozidlech spoustu výhod, tou hlavní je možnost ovládání každého kola zvlášť. U automobilů není potřeba spalovacího motoru a převodovky. Díky tomu se pro konstruktéry a designéry

těchto vozidel otevírá spoustu možností co udělat s volným prostorem, ať už zde umístit baterie, bezpečnostní prvky či různé nástavby u robotických vozidel. [10], [11], [12]



*Obrázek 3- hybridní vozidlo Lohner-Porsche Mixte Voiturette [10]*

## **2 Současní výrobci pohonů umístěných v kolech**

V předchozí kapitole byly popsány různé koncepce pohonů kola u vozidel. V této kapitole se zaměřuji na robotická vozítka vyráběná NASA. Dále pak na současné výrobce těchto pohonů, ať už na celý automobil, který má podobné řešení pohonů v kolech nebo na výrobce nabízející toto řešení jako samostatný pohon, který je možno zakomponovat do kol různých vozidel.

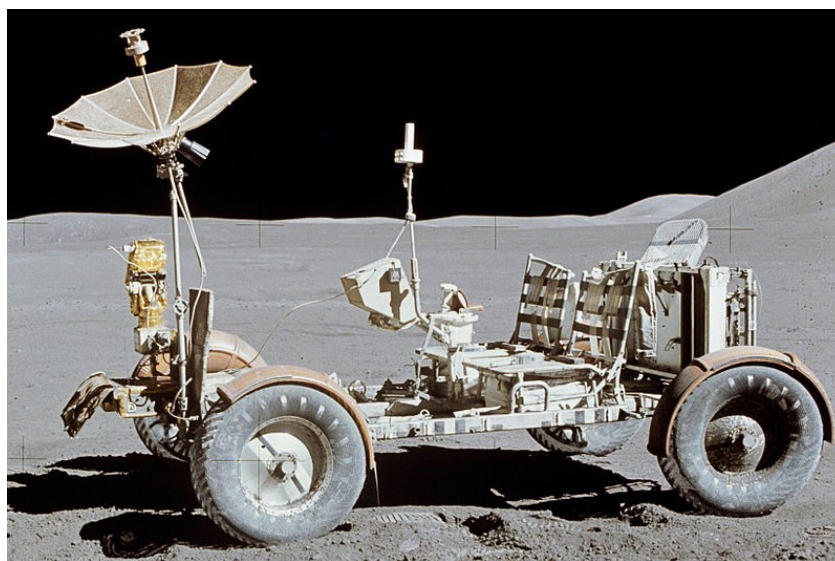
### **2.1 Robotická vozidla NASA**

Jak už je zmíněno výše, je jedním z průkopníků, kteří se na začátku 20. stol. vrátili ke koncepci pohonu zabudovaného do kola, NASA se svými robotickými vozidly. Ať už, se jednalo o vozidla přepravující lidi po Měsíčním povrchu nebo robotická vozítka v současné době operující na Marsu, všechna mají elektromotory, kterými jsou poháněny, umístěny v náboji kola.

#### **2.1.1 Lunar Roving Vehicle**

Neboli zkráceně Rover, je prvním vozidlem s pohonem v kolech, které NASA začala vyvíjet pro možnost vzdálenějšího průzkumu povrchu Měsíce. Zakázku na výrobu dostala firma Boeing, byly postaveny 4 kusy pro Apollo 15, 16 a 17 s jedním záložním

kusem. Rivery byly použity pro průzkum povrchu Měsíce. Byly to 4 kolové vozidla 3 metry dlouhá a 1,8 metrů široká, hmotnost byla 210 kg, s maximálním užitečným zatížením 490kg na povrchu Měsíce. Byl poháněn 4 samostatnými elektromotory umístěnými v kolech. Jednalo se o sériový stejnosměrný trakční motor o maximálním výkonu 200 W při 10 000 ot/s. Ten otáčel kolem přes harmonickou převodovku. Každé kolo bylo vybaveno mechanickou brzdou. Energii pro Rover zajišťovaly dvě baterie o kapacitě 121 Ah s napětím 36 V. Byl určen pro dva astronauty, kteří jej používali pro průzkum terénu a sbírání vzorků. Všechny tři vozidla najezdily dohromady na povrchu Měsíce 90,2 km. [13], [14]



*Obrázek 4 –Lunar Roving Vehicle na Měsíci [14]*

### **2.1.2 Robotická vozítka pro průzkum povrchu Marsu**

Poté, co koncepce s pohony umístěnými v kolech slavila úspěch na Marsu, se NASA vydala v průzkumu našich vesmírných sousedů ještě dále. Po měsíci jsou nám nejbližší Venuše s Marsem. Vzhledem k velmi vysokým teplotám na Venuši je pro průzkum mnohem vhodnější Mars. NASA k němu vyslala čtyři robotická vozítka, všechna byla šesti kolová a měla pohony umístěny v náboji kola. Prvním vozítkem byl Sojourner, ten byl součástí mise Mars Pathfinder, jednalo se o malé vozítko o rozměrech 65 x 48 x 30 cm (D x Š x V) a vážilo 10,6 kg. Pohybovalo se maximální rychlostí 1 cm/s a urazilo celkovou vzdálenost na planetě skoro 80m. Tato mise byla velkým úspěchem a motivací k tomu poslat na Mars dvě větší robotická vozítka.

Těmi se staly „dvojčata“ Spirit a Opportunity s rozměry 1,6 x 2,3 x 1,5 m (D x Š x V) metrů a vahou 184 kg. Ta byla opět vybavena šesti kolovým podvozkem, kde každé



kolo je poháněné a pohon je uvnitř. Byla vyslána kvůli terénnímu průzkumu Marsu, zaznamenala mnoho úspěchů. Vědci z NASA ztratili kontakt s vozítkem Spirit 22. března 2010 po více než 6 letech. Druhé vozítko Opportunity je funkční dodnes.

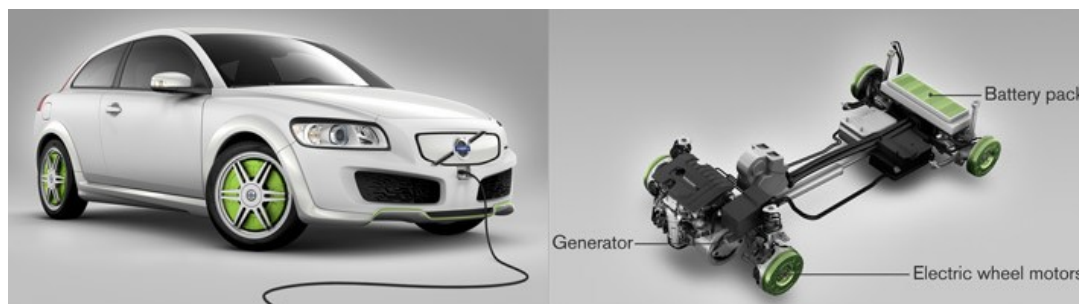
Z nich vychází zatím poslední mise Mars Science Laboratory s vozítkem Curiosity. Svou hmotností 899 kg spíše připomíná malý automobil, má rozměry 2,9 x 2,7 x 2,2 m (D x Š x V). V kolech o průměru 20“ se ukrývají elektromotory firmy Maxon. NASA uvádí, že takto těžké vozítko je schopno vyjet písčnou dunu o sklonu 12,5° a přejet až 60 cm překážku. Udrží se na svahu se sklonem 45°, aniž by se převrátilo. Maximální rychlost vozítka je 4 cm/s., průměrně se pohybuje okolo 1,5 cm/s. [15], [16]



*Obrázek 5 –autoportrét vozítka Curiosity na Marsu [16]*

## 2.2 Volvo ReCharge Concept

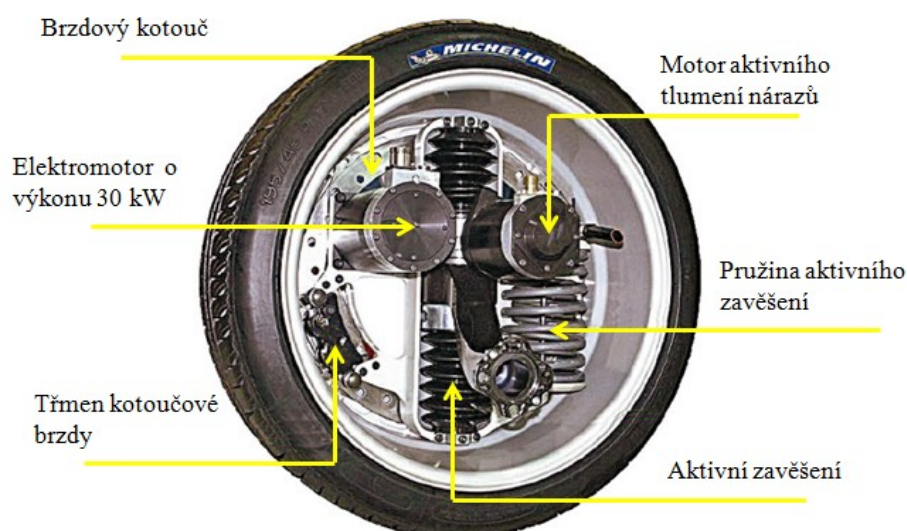
Jedná se o koncept vozidla založený na automobilu Volvo C30, který má ve všech čtyřech kolech umístěny elektromotory. Zde se jedná hlavně o ukázkou toho, jak lze docílit nižší spotřeby u automobilů. Automobil je tudíž možné brát jako „čtyřkolku“, s možností nezávislého ovládání každého kola zvlášť. Energii elektromotorům dodává Li-Pol akumulátor, na který automobil ujede až 100 km. V případě vybití akumulátoru začne pracovat spalovací motor o objemu 1,6 l a výkonu 105 koní, který pouze vyrábí elektřinu pro elektromotory. Volvo udává, že tento automobil ujede v kombinovaném cyklu 100 km pouze za 2,8 l benzínu. [17]



Obrázek 6 – ukázka Volvo ReCharge Concept [17]

## 2.3 Michelin Active Wheel

Jedním z prvních samostatně vyvíjených konceptů pohonů v kolech je ten od Michelinu, na kterém pracoval společně s firmami Heuliez a Orange. Prototyp byl představen v roce 2008 na Pařížském autosalonu. V případě Michelin Active Wheel je v jediném kole zakomponován samostatný pohon, ten je dále doplněn brzdovým systémem a odpružením s aktivním pohlcováním nárazů. Hlavní výhodou je šetření místa uvnitř vozidla, kde není potřeba použít samostatný motor, převodovku, diferenciál, odpružení ani brzdy. Vše je obsaženo uvnitř jediného kola. Poprvé byl tento systém použit v roce 2010 v konceptu automobilu Opel Agila, v důsledku uvolněního místa bylo možno použít více baterií pro delší dojezd a zvětšilo se také místo pro zavazadla. Součástí kola jsou dva elektromotory. První se stará o aktivní pohlcování nárazů a ten druhý o pohon. Elektromotor starající se o pohon má výkon 30 kW a krouticí moment 58 Nm. Celý systém dohromady váží 43 kg a vejde se do 17“ ráfku s šířkou 195 mm. [18], [19]



Obrázek 7 - Michelin Active Wheel [18]

## 2.4 Protean Drive

Je pohon vyráběný firmou Protean Electric a v dnešní době se už jedná prakticky o pohon určený k sériové výrobě. Firma Protean Electric se chystá od roku 2014 vyrábět až 50 tisíc pohonů za rok. Na rozdíl od Michelin Active Wheel se Protean Drive nesnaží nahrazovat odpružení kol u automobilu a tím pádem je výrobně mnohem jednodušší. Právě díky tomu je pohon po poměrně jednoduchých úpravách možné integrovat do jakéhokoliv vozidla. Díky tomuto řešení je možné udělat hybridní elektromobil s prakticky jakéhokoliv automobilu. Velikost pohonu zatím umožňuje integraci pouze do kol o velikosti od 18“ do 24“. Základem Protean Drive je vlastně frameless motor, ten je udělán tak, aby se dal připevnit na zavěšení kol. Při integraci do kola nahrazuje také brzdy, proto je zde také možnost brzdít elektromotorem. Protean Electric se rozhodla prezentovat svůj výrobek na automobilu Mercedes Benz třídy E upravený firmou Brabus, ten se pak jmenuje Brabus Hybrid. Pohon má průměr 420 mm a bez úprav pro zavěšení je široký 115 mm. Kontinuální výkon je 64 kW a krouticí moment je 500 Nm, ve špičkách dosahuje výkon až 81 kW a krouticí moment až 800 Nm. Hmotnost celého pohonu je 31 kg. Protean Electric plánuje výrobu také menších a méně výkonných verzí svého pohonu pro integraci do kol menších průměrů. [20]



*Obrázek 8 - řez pohonem Protean Drive [20]*



## 2.5 Hub motory

Jsou v dnešní době velmi rozšířené, jsou to motory integrované přímo v náboji kola. Většinou jde o bezkartáčové motory s vnějším rotorem. Výrobci těchto motorů je v dnešní době poměrně hodně. Používají se hlavně pro pohon elektro - bicyklů, elektro – skútrů, invalidních vozíků, ale např. i těžké techniky jako je zdvihací vozík. Dají se integrovat prakticky do jakéhokoliv kola, pohony mají velikost od 5“ do 15“ a pokrývají široký rozsah výkonů, od 150 W do 10 kW. Součástí může být i brzda, používají se i vysokootáčkové motory s integrovanou převodovkou, to vše je ukryto uvnitř tohoto pohonu. Vzhledem k tomu, že jsou přímo určeny pro integraci do kol bicyklu nebo malého motocyklu se zdají být vhodné pro integraci do kol mobilního robotu. [21]



*Obrázek 9 – HUB motor ve výpletu elektro-bicyklu*

### 3 Požadavky pro konstrukci vlastního pohonu kola

Základní požadavky na konstrukci vlastního pohonu integrovaného do kola vyplývají ze zadání diplomové práce. Dále se bere v úvahu velikost a parametry pohonů, kterými se zabývá předchozí kapitola. Je potřeba brát v úvahu použití v kolovém robotu.

#### Hlavní požadavky:

- Integrace pohonu do náboje kola
- Použití elektromotoru
- Maximální rozměry celého pohonu  $\varnothing 300 \times 180$  mm
- Možnost odpojení pohonu od samotného kola (použití spojky)
- Použití bezpečné brzdy
- Minimalizace energetických nároků na brzdu, spojku

#### Vedlejší požadavky:

- Zjištění jaký sklon terénu vyjede mobilní robot o různé váze s použitím integrovaného pohonu v kolech
- Zjištění maximálního zrychlení při různé váze robotu s použitím integrovaného pohonu
- Kompaktnost provedení
- Maximální krouticí moment k dispozici od nulových otáček
- Možnost rekuperačního brzdění

## 4 Popis pohonu integrovaného v náboji kola

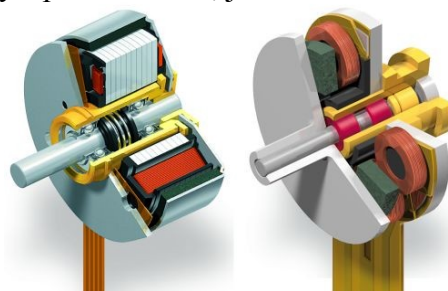
V předchozí kapitole vyvstali požadavky na konstrukci vlastního pohonu integrovaného v náboji kola. Tato kapitola se zaměřuje na popis komponent a možnost použití v tomto pohonu. Pro případ pohonu, který je potřeba umístit do náboje kola je potřeba počítat s nutností minimalizace hmotnosti a rozměrů tohoto pohonu. Z tohoto důvodu se jeví jako zvláště vhodné použití speciálních elektromotorů. Zde se jedná hlavně o dva typy elektropohonů, těmi jsou tzv. FLAT motory a FRAMELESS motory, které oproti klasickým stejnosměrným motorům mají lepší poměr velikost/výkon. Dále je potřeba do pohonu zakomponovat bezpečnou brzdu a pro požadavek odpojení pohonu od kola také spojku. To vše s ohledem na minimalizaci energetických nároků.

### 4.1 Použité elektromotory

V tomto případě se budu zabývat pouze dvěma typy stejnosměrných elektromotorů a to FLAT motory, také nazývanými diskové a speciálním typem stejnosměrných elektromotorů, FRAMELESS motory, nazývanými také bezrámové elektromotory.

#### 4.1.1 FLAT motory

Jedná se o ploché, diskové elektromotory, které jsou vhodné pro zakomponování zejména do prostor s nedostatkem místa. Průkopníkem mezi těmito motory je firma Maxon motor. Její pohony EC-flat programu jsou elektronicky komutované motory. Jedná se o elektronické přepínání proudu do sekce vinutí na základě informace snímače o úhlu natočení rotoru, tyto motory mohou mít integrovanou veškerou elektroniku. Všechny tyto motory mají výhodu toho, že jsou ploché a tenké, mají ovšem poměrně nízký krouticí moment. Vynikají ovšem v rozsahu řízení rychlostí a možností krátkodobého přetížení několikanásobným momentem. Pro navýšení trvalého krouticího momentu je k nim potřeba připojit převodovku, kde o svou výhodu plochosti trochu přicházejí. V porovnání s klasickými elektromotory s převodovkou, jsou ale v tomto ohledu lepší. [22]

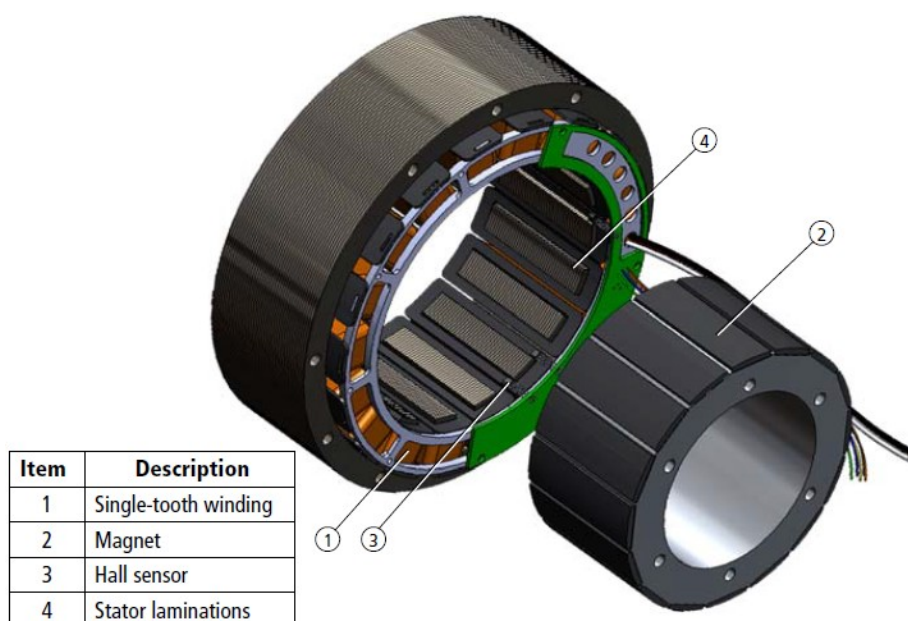


Obrázek 10 - řez různými EC-flat motory firmy Maxon motor [22]

### 4.1.2 Frameless motory

Jinak se také nazývají bezrámové motory. Jak již název napovídá, jedná se o elektromotory, které nemají vlastní rám či pouzdro, ve kterém jsou uloženy, místo toho jsou určeny k přímému zabudování do stroje nebo zařízení, které mají pohánět. Jde o stejnosměrné elektromotory. Jsou to prstencové kroužky s velkým poměrem průměru k délce motoru. Prakticky se skládají pouze ze dvou prstenců, z nichž jeden s budícím vinutím je stator a druhý prstenec, většinou s permanentními magnety, je rotor elektromotoru. Jelikož se jedná o brushless motory, mohou být vybaveny hallovými senzory pro zajištění elektronické komutace. Díky tomu jsou vhodné pro použití v aplikacích s přesným pohybem vyžadujících vysoký krouticí moment a kompaktní rozměry pohonu. Tyto motory jsou např. používány v průmyslových robotech, ve zbraňových platformách, polohovacích systémech, atp. Mají výbornou dynamickou charakteristiku, maximální krouticí moment je dostupný prakticky od nulových otáček. Mají výborný poměr hmotnosti a zástavbových rozměrů ke krouticímu momentu.

Z důvodu jejich bezrámové konstrukce nejsou tyto pohony vybaveny žádnými ložisky ani hřídelemi, proto je potřeba počítat s bezpečným a přesným uložením motoru ve stroji pro dosažení maximálních možných výkonů. Vzhledem k absenci hřídele je potřeba u stroje počítat s jiným připojením na hřídel nebo stroj, který má být poháněn. Motor je vhodný k zabudování do malých prostor. Je potřeba zajistit krytí motoru před vnějšími vlivy. [23]



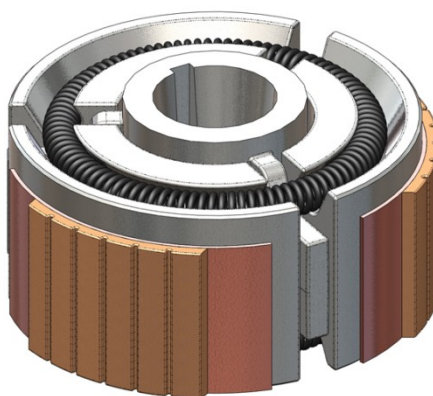
Obrázek 11 - Brushless torque motor - frameless series [23]

## 4.2 Komponenty pro odpojení pohonu od kola

Jedním z hlavních požadavků na celý pohon, je možnost odpojení pohonu od kola, z důvodu poruchy, tak aby pohon kola nebránil v pohybu celého robotu. Tento požadavek se dá poměrně snadno splnit zařízením určitého druhu spojky do pohonu. Spojka umožňuje spojení hnací a hnané hřídele a slouží k přenosu krouticího momentu. Spojek je v dnešní době mnoho druhů, ať už se jedná o mechanické, pneumatické, hydraulické, magnetické či elektromagnetické. Nejvhodnějším typem spojek pro pohon s elektromotorem jsou spojky mechanické a elektromagnetické, kvůli nimž není potřeba řešit např. hydraulické nebo pneumatické čerpadlo, jako by to bylo u těchto spojek. [24]

### 4.2.1 Odstředivé spojky

Jedná se o spojky ovládané mechanicky. Tato spojka při zvýšení otáček automaticky spojí hnací a hnanou hřídel. Skládá se z bubnu a unášeče, na kterém je umístěno obložení spojky složené z několika segmentů. Tyto segmenty jsou k sobě přitlačovány pomocí pružiny. Když se motor roztočí na určité otáčky, segmenty vlivem odstředivé síly překonají tah pružiny a začnou zabírat do bubnu a tím pádem přenášet krouticí moment. Otáčky potřebné k sepnutí spojky se nastavují pomocí síly pružiny. Tato spojka se zdá být vhodná pro použití v pohonu kola. Roztočením motoru dojde pomocí této spojky k připojení kola. Při případné poruše se motor zastaví, otáčky klesnou pod úroveň, ve které je spojka schopna zabírat a dojde k samovolnému odpojení pohonu od kola robotu. Výhodou je nulová energetická náročnost, vše je ovládáno pouze mechanicky. Nevýhodou u tohoto typu spojky je nemožnost připojení pohonu ke kolu od velmi nízkých otáček a tím pádem je potřeba řešit převodování, atd. [24]



Obrázek 12 – Detail unášeče s přitlačnými segmenty [24]



#### 4.2.2 Elektromagnetické spojky

Jsou spojky ovládané pomocí elektrického proudu. Jsou složené s elektromagnetů, to jsou vlastně cívky s vodivým jádrem pro zvýšení účinnosti. Po průchodu elektrickým proudem se tyto cívky stávají magnetickými. Pomocí velikosti proudu se dá nastavovat síla, se kterou spojka sepne, tím je možná plynulá regulace. Tyto spojky jsou vhodné pro použití v pohonu umístěného v kole robotu. Použití je možné už od nulových otáček pohonu, vše záleží na přivedeném proudu. Při poruše pohonu se vypne proud a spojka se automaticky rozpojí a tím umožní kolu se volně otáčet. Nevýhodou těchto spojek je nutnost trvalého napájení při sepnutí a tím pádem poměrně vysoká energetická náročnost. Proto je vhodné použití záložního zdroje, kvůli výpadku nebo vybití toho primárního. Při spuštění se tyto spojky zahřívají. [24], [25]

#### 4.2.3 Spojky ovládané elektro-permanentními magnety

Jedná se zatím o teoretický druh spojek, ale stejného principu se využívá u elektro-permanentních upínačů. Jsou podobné elektromagnetickým spojkám, ale materiál uvnitř je feromagnetický. Pomocí jednoho elektrického impulsu dojde ke zmagnetování materiálu a ten se tím pádem stává permanentním magnetem. Pro odmagnetování se použije opačný elektrický impuls. Oproti elektromagnetickým spojkám má výhodu v nízké energetické náročnosti, nezahřívá se. Je zde také vhodné použití záložního zdroje. Nevýhodou je vysoká cena feromagnetických materiálů nutných k fungování elektro-permanentních magnetů uvnitř takovýchto spojek. [24], [27]

### 4.3 Komponenty potřebné k zabrzdění kola

Jedním z hlavních požadavků na všechny vozidla je nutnost bezpečně zastavit. Proto je potřeba do pohonu zabudovat také brzdu. V případě použití stejnosměrného elektromotoru lze použít dynamické brzdění motorem. Při nulových otáčkách je ovšem nutné použít i jiný typ brzdy, abychom zbytečně neplýtvali elektrickou energií pro držení motoru, protože dynamické brzdění nefunguje. Z tohoto důvodu je vhodné zařadit do pohonu kola také nějaký typ brzdy, založeném na mechanickém kontaktu. V tomto případě bude nejvhodnější použití kotoučové brzdy. Ta může být ovládána hydraulicky, pneumaticky nebo elektromagneticky. Stejně jako v případě spojky není vhodné použití hydraulicky nebo pneumaticky ovládané kotoučové brzdy vzhledem k nutnosti použít čerpadlo. Z toho důvodu vyplývá jako nejvhodnější použití nějakého typu elektromagneticky ovládané kotoučové brzdy.

### 4.3.1 Elektromagneticky ovládané brzdy

Ve většině případů se jedná o brzdy lamelové, ty jsou složeny z několika lamel, kde vždy jedna lamela je připojena na vnější část brzdy spojené s rámem a další je spojena přes unášec s hřídelí, kterou má brzdít, takto se lamely střídají. Jedná se vlastně o kotoučovou brzdou s více kotouči. Prakticky jsou dva druhy elektromagneticky ovládaných brzd a to v neaktivním stavu trvale zabrzděné, které se po aktivaci elektromagnetu odbrzdí nebo takové, které po aktivaci elektromagnetu začnou brzdít. U brzd, které začnou brzdít při aktivaci elektromagnetu, se dá plynule regulovat brzdná síla. Jejich nevýhodou ovšem je, že při výpadku elektrického proudu je takováto brzda nefunkční. Druhým a v robotice používanějším typem jsou brzdy v neaktivním stavu zabrzděné a to díky pružinám, které vytvářejí tlak na lamely. Mezi lamelami vzniká tření zabraňující pohybu. Při aktivaci elektromagnetu je překonána síla pružin a tím pádem dojde k odbrzdění. Jedná se o bezpečnější typ brzdy na rozdíl od první. Nevýhodou je, že pro jízdu je zapotřebí stále dodávat proud, při výpadku proudu je brzda zabrzděna a není možno s vozidlem odjet, je zde vhodné řešit záložní zdroj. Není možné plynule měnit sílu brzdění. [26]

### 4.3.2 Brzdy ovládané elektro-permanentním magnetem

V případě brzd ovládaných elektro-permanentním magnetem jde stejně jako u spojek o teoretický druh brzdy, který není možné koupit jako funkční celek. V případě brzdy je možné použít samostatný elektro-permanentní magnet, který bude ovládat např. třmen brzdy nebo lamely. Podobný princip fungování s přitlačnými pružinami je stejný jako u elektromagnetické brzdy. Místo trvalého dodávání proudu je magnet ovládán jednotlivými impulzy. Pro zapnutí magnetu jeden impuls a pro vypnutí opačný impuls. Výhodami je velmi nízká energetická náročnost, ale je vhodné použít záložní zdroj. Na velikosti proudového impulsu záleží velikost upínací síly magnetu. Není zde možnost plynule regulovat sílu, ale teoreticky je jí možné regulovat skokově. [27]

### 4.3.3 Elektromagnetické spojko-brzdy

Pracuje na stejném principu jako samostatné elektromagnetické spojky a brzdy. V tomto případě je spojka i brzda integrovaná do jednoho funkčního celku. V důsledku toho je celek kompaktnější, má nižší hmotnost a ke svému fungování nepotřebuje tolik energie jako samostatná spojka a brzda. [26]

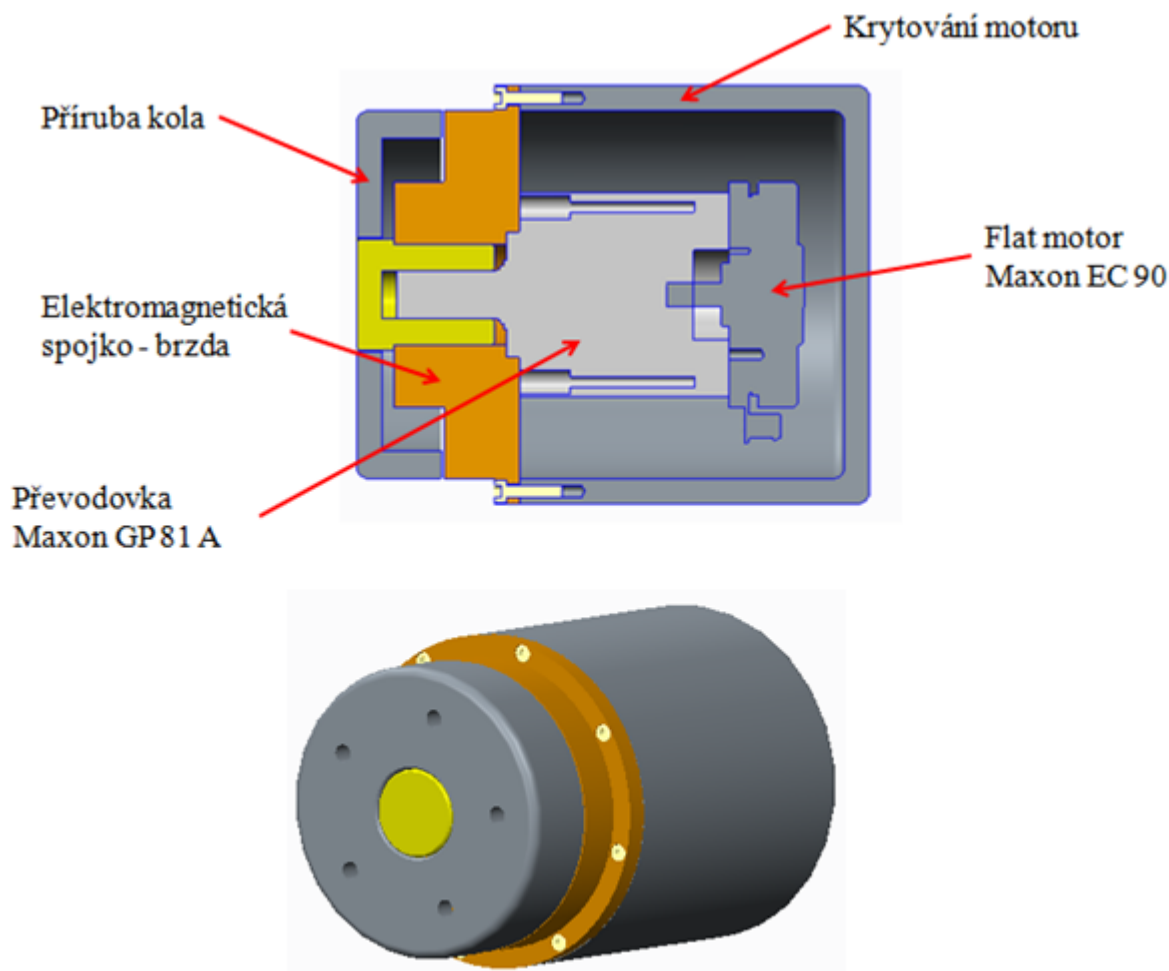
## 5 Koncepční varianty řešení pohonu v náboji kola

V předchozích kapitolách jsou popsány všechny principy a možnosti použití pohonu integrovaného v kole. V této kapitole jsou navrženy tři různé koncepční varianty řešení pohonu integrovaného do kola. Dále jsou popsány použité komponenty a je vysvětlen princip jejich fungování. Ve variantách nejsou zakresleny některé spojovací materiály, ložiska, gufera, atd.

### 5.1 Varianta A

Tato varianta se skládá z několika hlavních částí, o pohon se zde stará Flat motor od firmy Maxon motor EC 90. Ten má výkon 90 W a krouticí moment 0,533 Nm, krátkodobě je schopen vyvinout krouticí moment až 4,46 Nm. Tento krouticí moment sám o sobě nestačí pro pohon mobilního robotu, proto je k němu připojena také převodovka. Ta je opět od firmy Maxon motor a jedná se o převodovku GP 81 A s převodovým poměrem 91:1, který umožňuje trvale přenést až 120 Nm a krátkodobě až 180 Nm. Je potřeba zařadit elektroniku na hlídání maximálního krouticího momentu, aby se nepřetížila převodovka. Požadavek na bezpečné zabrzdění a možnosti odpojení od kola je zde proveden pouze jedním zařízením. Jedná se o elektromagneticky ovládanou spojko-brzdu od firmy Ortlinghaus. Spojka i brzda jsou integrovány do jednoho funkčního celku. V něm jsou obsaženy dva elektromagnety, kdy jeden ovládá lamely spojky a druhý kotouč brzdy. Motor je s převodovkou dodáván už jako smontovaný celek firmou Maxon motor. Tento celek je poté pomocí šroubů propojen s elektromagneticky ovládanou spojko-brzdou. Všechny tyto komponenty jsou poté vloženy do jakéhosi hrnce, který tvoří krytování motoru a zároveň slouží k upevnění na zavěšení kola mobilního robotu. Kryt motoru zabraňuje vniknutí vody a nečistot do prostoru motoru a převodovky. Spojko-brzda má přírubu, za kterou je ke krytu motoru přišroubována. Příruba kola je součástí spojko-brzdy a zároveň se na ní připevňuje kolo robotu. Spojka zde zajišťuje přenos krouticího momentu z motoru přes převodovku na přírubu kola. Zároveň slouží k odpojení kola od pohonu v případě poruchy elektromotoru nebo zadření převodovky. Spojka je v normálním stavu neaktivní, rozepnutá a tím pádem umožňuje volnoběžné otáčení kola a po zapnutí a průchodu proudu připojí pohon ke kolu. Brzda je v normálním stavu zabrzděna a pro odbrzdění je potřeba připojení elektrické energie. V neaktivním stavu, kdy je spojko-brzda odpojena od elektrické energie, ovšem není možné otáčení kola, protože je brzda zabrzděna. Takže pohyb robotu alespoň na volnoběh je možný pouze při napájení brzdy,

kdy se pohon odbrzdí. Dále pak se při napájení spojky dá připojit i pohon. V případě spojko-brzdy jako celku je odebíraná energie menší v důsledku optimalizace odběru proudu oproti samostatným systémům. Z hlediska zástavbových rozměrů se jedná o nejmenší, ale zároveň o nejméně výkonný pohon. Maximální vnější rozměry jsou  $\varnothing 170 \times 200$  mm. Vzhledem k poskytovaným výkonům se tento pohon hodí pouze pro menší mobilní roboty.

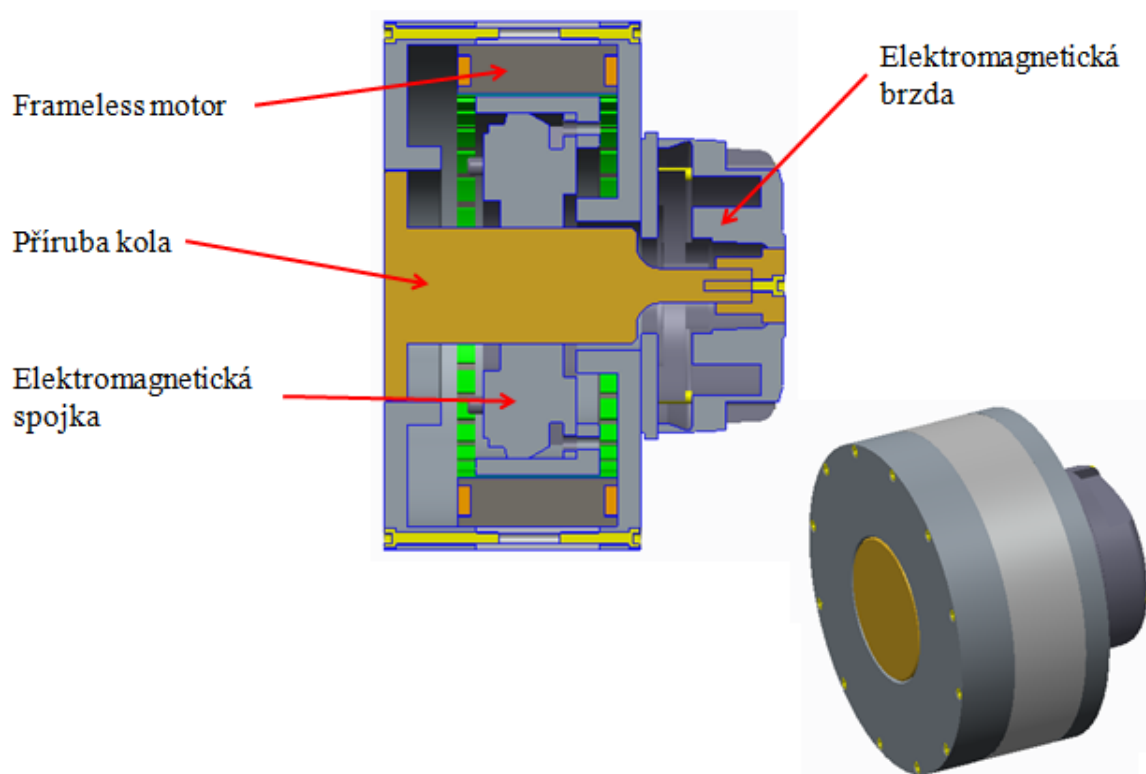


Obrázek 13 - Popis varianty A

## 5.2 Varianta B

Oproti variantě A je ve variantě B místo flat motoru použit frameless motor. Jedná se o frameless motor firmy Megaflux ze série MF0210, ten dosahuje výkonu až 21 kW a stálého krouticího momentu 41,1 Nm. Tento motor je vysoce přetížitelný a dosahuje špičkového krouticího momentu 305,7 Nm. Těchto hodnot dosahuje už od nulových otáček. Díky tomu a díky svým výkonovým parametrům není potřeba použití převodovky. To snižuje hmotnost a setrvačnost celého pohonu. Motor se skládá ze dvou částí statoru a rotoru, ten není osazen žádnými ložisky, ty je potřeba do rámu vhodným způsobem přidat.

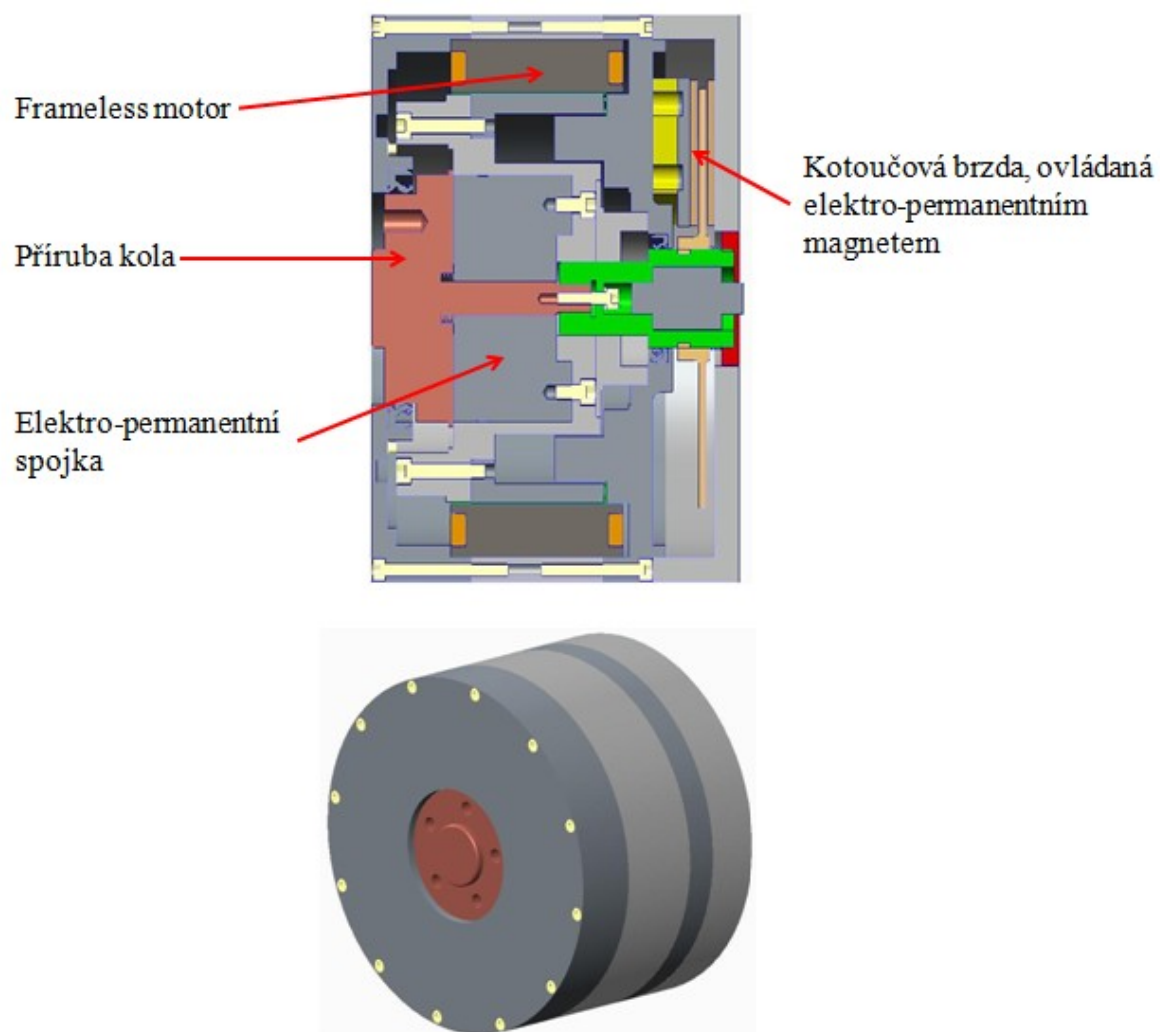
Dovnitř obruče statoru je pomocí šroubu přidělána spojka ovládaná pomocí elektromagnetu. Jedná se o lamelovou spojku, která je spojena s hřídelí. Tato hřídel je zároveň i přírubou pro připojení kola robotu. Z druhé strany je tato hřídel pomocí těsného pera spojena s elektromagneticky ovládanou brzdou. Součástí statoru motoru je ocelový prstenec, který vlastně tvoří vnější nosný rám motoru. K tomuto prstenci jsou z obou stran pomocí šroubů připevněny kryty. Pravý kryt zároveň slouží jako nosič brzdy a motoru. Přes tento kryt je pohon připojen na zavěšení podvozku robotu. Součástí pohonu je tedy samostatná spojka a brzda. Brzda je v neaktivním stavu zabrzděna, při přivedení elektrické energie se aktivuje elektromagnet, brzda se uvolní a dovolí volné otáčení kola robotu. Z toho vyplývá, že k volnoběžné jízdě je zapotřebí dodávat energii. Spojka je v neaktivním stavu rozpojená, po přivedení elektrického proudu spojka sepne. Tím spojí rotor motoru s přírubou kola a přenesení na kolo krouticí moment. Aby se ale mohl robot rozjet, musí být aktivována brzda, tím dojde k jejímu odbrzdění. Je tedy potřeba dodávat energii všem komponentům pohonu. Tento motor umožňuje regenerativní brzdění, ale kvůli tomu je zapotřebí dodávat energii elektromagnetické spojce i brzdě, díky tomu je pohon poměrně náročný na spotřebu energie. Největší vnější rozměry pohonu jsou  $\varnothing 230 \times 175$  mm. Díky svému výkonu a krouticímu momentu je vhodný i pro integraci do kola větších a těžších robotů.



Obrázek 14 - Popis varianty B

### 5.3 Varianta C

Varianta C používá stejný frameless motor Megaflux série MF0210 jako varianta B, tedy o výkonu 21 kW a špičkovém krouticím momentu až 305,7 Nm. Tato varianta používá také samostatnou spojku a brzdu, ty jsou ovládány pomocí podobného principu jako ovládání elektromagnetických spojek a brzd, ale není potřeba trvalého dodávání elektrického proudu. Jako spojka je použito zařízení pro upínání obrobků na soustruh. Jedná se o sklíčidlo s elektro-permanentními magnety uvnitř. Ty jsou ovládány pomocí proudových impulzů, kde jeden impulz toto sklíčidlo aktivuje a vytvoří magnetické pole, opačným impulzem se sklíčidlo opět deaktivuje. Sklíčidlo funguje jako spojka ve spojení s přírubou kola, kde se po aktivaci sklíčidla vytvoří magnetické pole, které k sobě tuto přírubu přitáhne. Dále je zde použita kotoučová brzda, která je také ovládána pomocí elektro-permanentních magnetů. Na hřídel spojenou s přírubou kola je nasazen kotouč brzdy, ten je umístěn mezi dvěma čelistmi, jedna čelist je pevná a druhá je pohyblivá. Pohyblivá čelist je pomocí pružin přitlačována na kotouč a druhou nepohyblivou čelist. Po aktivaci elektro-permanentních magnetů je překonána síla pružin a dojde k uvolnění kotouče. Poté je možné volně otáčet koly robotu připojené přes přírubu kola v případě poruchy pohonu, aniž by bylo potřeba dále dodávat energii pro odbrzdění. Stejně jako v případě spojky se brzda ovládá pouze pomocí jednotlivých pulzů. Z tohoto důvodu je zde oproti předchozím dvěma variantám mnohem nižší energetická náročnost. Spojka je uložena ve speciální přírubě spojené s vnitřní částí rotoru pomocí šroubů. Při zapnutí spojce se přes ni dostává krouticí moment ke kolům robotu. Spojka i brzda jsou ovládány nezávisle a proto je zde také možnost regenerativního brzdění bez nutnosti pohánět energii spojku nebo brzdu. Na vnější ocelový prstenec motoru jsou pomocí šroubů připevněny kryty, které zabraňují vnikání vlhkosti a prachových částic dovnitř k motoru. Na pravý kryt je dále ještě připojen vnější kryt brzdy, který zde slouží jako jedna z čelistí a dále také nosná část k propojení se zavěšením podvozku robotu. Takto vzniklý celek má vnější rozměry Ø230 x 149 mm. Vzhledem k nízké spotřebě energie a vysokému výkonu a krouticímu momentu je tento pohon vhodný k integraci do kola i větších a těžších robotů.



*Obrázek 15 - Popis varianty C*

## 6 Výběr optimální varianty – hodnotová analýza

V předchozí kapitole byly popsány jednotlivé varianty řešení. V této kapitole je provedena hodnotová analýza těchto variant. Za pomoci vícekritériálního hodnocení bude z těchto variant vybrána optimální varianta pohonu v kole robotu. [6]

### 6.1 Hodnoty jednotlivých kritérií

Pro posouzení úrovně daných kritérií, je zapotřebí využít bodovací stupnici. [6]

Hodnocení kritéria	Hodnota kritéria (body)
Vysoká úroveň	10
Dobrá úroveň	8
Průměrná úroveň	5
Nízká úroveň	3
Nevyhovující úroveň	1
Nepřízniví stav	0

*Tabulka 1 - Bodové hodnoty jednotlivých kritérií*

### 6.2 Charakteristika hodnotících kritérií

Pro hodnocení variant řešení jsou vybrány tyto hodnotící kritéria. Každá varianta je poté obodována v pravé části tabulky.

Kritérium	Popis kritéria	Označení kritéria	Varianta		
			A	B	C
Energetická náročnost	S ohledem na spotřebu energie jednotlivých komponent	K1	8	5	10
Výkon pohonu	Určuje výkon a krouticí moment elektromotoru	K2	3	8	8
Zástavbové rozměry	Určují maximální rozměry pohonu	K3	10	5	8
Efektivita využití prostoru uvnitř pohonu	S ohledem na to, jak dobře je využit vnitřní prostor pohonu	K4	5	8	10
Složitost konstrukce a montáže	Určuje náročnost výroby a montáže jednotlivých komponent	K5	8	8	5
Náklady na pořízení komponentů	Jedná se o náklady na pořízení všech použitých komponent	K6	10	8	5

*Tabulka 2 – Hodnotící kritéria a jejich popis*



### 6.3 Významnost kritérií

Pro kritéria byla zvolena následující významnost. Pro váhu významnosti  $q$  byla zvolena lineární závislost.  $q = 0,25 \cdot v + 1$ ,

Kde  $v$  - je počet voleb

Pomocí metody porovnání párů určíme váhy významnosti jednotlivých kritérií. [6]

Porovnávané páry kritérií					Počet voleb $v$	pořadí	váha významnosti $q$
K1	K1	K1	K1	K1	4	1.	2
K2	K3	K4	K5	K6			
	K2	K2	K2	K2	3,5	2. - 3.	1, 875
	K3	K4	K5	K6			
		K3	K3	K3	0,5	6.	1, 125
		K4	K5	K6			
			K4	K4	3,5	2. - 3.	1, 875
			K5	K6			
				K5	1	5.	1, 25
				K6	2,5	4.	1, 625

Tabulka 3 - Metoda trojúhelníků párů

### 6.4 Vážený index kritéria

Vážený index kritéria = počet bodů  $\cdot q$

Varianta A			
Kritérium	Počet bodů	Váha významnosti $q$	Vážený Index kritéria
K1	8	2	16
K2	3	1, 875	5, 625
K3	10	1, 125	11, 25
K4	5	1, 875	9, 375
K5	8	1, 25	10
K6	10	1, 625	16, 25
Celkový součet vážených indexů kritéria varianty A			68, 5

Tabulka 4 - Součet vážených indexů kritéria varianty A

Varianta B			
Kritérium	Počet bodů	Váha významnosti q	Vážený Index kritéria
K1	5	2	10
K2	8	1, 875	15
K3	5	1, 125	5, 625
K4	8	1, 875	15
K5	8	1, 25	10
K6	8	1, 625	13
Celkový součet vážených indexů kritéria varianty B			68, 625

Tabulka 5 - Součet vážených indexů kritéria varianty B

Varianta C			
Kritérium	Počet bodů	Váha významnosti q	Vážený Index kritéria
K1	10	2	20
K2	8	1, 875	15
K3	8	1, 125	9
K4	10	1, 875	18, 75
K5	5	1, 25	6, 25
K6	5	1, 625	8, 125
Celkový součet vážených indexů kritéria varianty C			77, 125

Tabulka 6 - Součet vážených indexů kritéria varianty C

## 6.5 Součet vážených indexů a stanovení pořadí variant

Pořadí	Varianta	Celkový součet vážených indexů
1	C	77, 125
2	B	68, 625
3	A	68, 5

Tabulka 7 - Pořadí jednotlivých variant

## 6.6 Celkové zhodnocení kapitoly

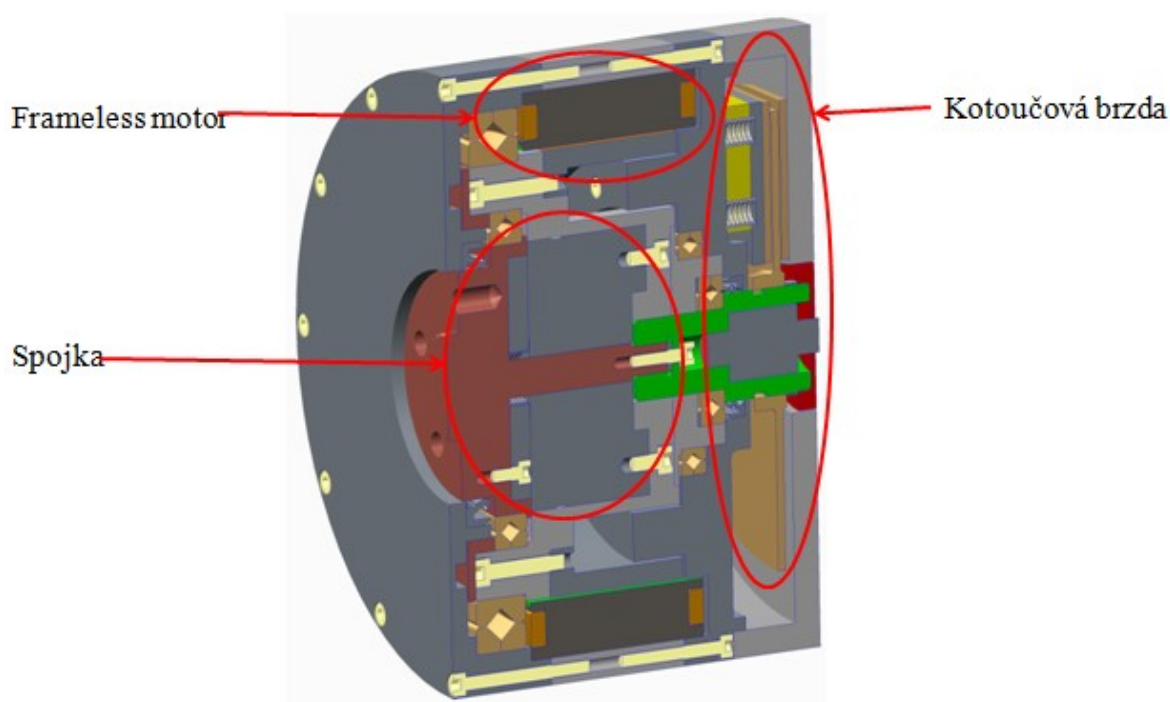
Po stanovení kritérií, podle kterých byly jednotlivé varianty porovnávány, a stanovení významnosti kritérií bylo přistoupeno k sečtení jednotlivých bodů. Pomocí hodnotové analýzy jsem dospěl k závěru, že optimální variantou je varianta C, která získala 77, 125 bodů. Tato varianta bude dále zpracována a podrobně popsána.

## 7 Konstrukční řešení optimální varianty

V této kapitole je zdokumentována a podrobněji popsána optimální varianta pohonu kola mobilního robota integrovaného do náboje kola. Jsou zde popsány použité komponenty a je vysvětlen princip jejich fungování. Jsou zde specifikovány další požadavky nutné k použití pohonu v kole robota.

### 7.1 Popis základních součástí pohonu

Tento pohon se skládá ze tří základních stavebních kamenů, které zajišťují všechny požadované funkce. O uvedení do pohybu se stará bezrámový elektromotor Megaflux frameless MF0210, který je srdcem celého pohonu. Dále je zde použita kotoučová brzda vlastní konstrukce ovládaná pomocí elektro-permanentních magnetů, starající se společně s dynamickým brzděním elektromotoru o zastavení pohonu. O přenos krouticího momentu z elektromotoru na kolo robota se stará spojka, jejímž základem je sklíčidlo s elektro-permanentními magnety a příruba kola s kovovým jádrem jako lamela spojky. Dále jsou zde příruby, pomocí kterých jsou jednotlivé součásti uloženy, ložiska, spojovací součásti, utěšňovací kroužky a rotační translátor starající se o přísun energie ke spojce. Práce se poté bude zabývat podrobnějším popisem každé jednotlivé součásti.



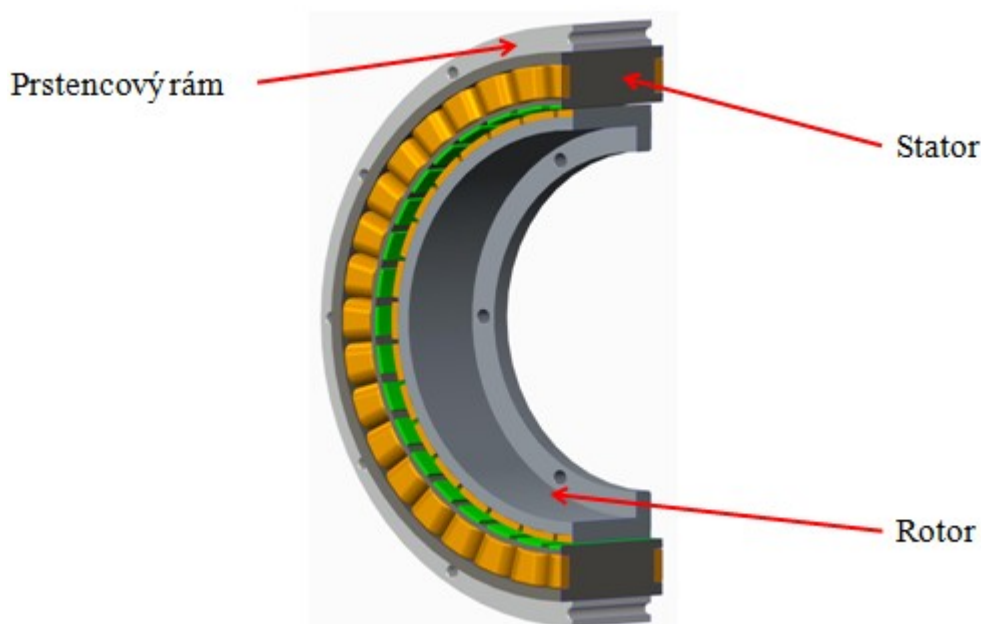
Obrázek 16 – Popis základních součástí použitých v pohonu

## 7.2 Bezrámový motor (frameless motor)

Pro pohon je použit vysoko výkonný bezrámový elektromotor firmy Megaflux, ze série MF 0210. Jedná se o prstencové kroužky s velkým průměrem a malou šířkou, jsou velmi vhodné pro zabudování přímo do stroje. Motor může být dodán společně se senzory pro elektronickou komutaci. Motor je vysoce přetížitelný a má nízkou setrvačnost proto je zvláště vhodný pro použití v robotice. Motory série MF 0210 poskytují trvalý krouticí moment od 8,7 Nm až do 83,6 Nm. Motor dosahuje maxima krouticího momentu už od nulových otáček. Jsou navrženy na stejnosměrné napětí 48, 150 nebo 300 V. [23]

### 7.2.1 Megaflux Frameless Torque Motor MF 021050

Pro pohon kola je v tomto případě použit motor MF 021050. Ten se skládá ze dvou hlavních částí. Tím je stator s 32 pólovým budícím vinutím umístěným v kleci, šířka klece je 70 mm. Na stator je připevněna kovová obruč, která tvoří prstencový rám motoru. Tento rám je součástí statoru a má vnější průměr 230 mm. Pomocí rámu se motor zabuduje do stroje nebo v tomto případě pohonu. V rámu je kvůli tomu vyvrtáno 12 děr se závitem M5 na průměru 220 mm. Budící vinutí lze v tomto případě volit pro napětí 48, 150 nebo 300 VDC. Druhou hlavní součástí je rotor, jedná se o ocelový prstenec, na jehož vnější část jsou připevněny permanentní magnety. Vnitřní rozměry prstence jsou průměr 150 mm a šířkou 54 mm. Prstenec má osazení s průměrem 130 mm a šířkou 10 mm, na průměru 140 mm je vyvrtáno šest děr se závitem M6, kterým se rotor připevňuje na hřídel, kterou má pohánět. [23]



Obrázek 17 - Popis řezu motoru MF 021050 [23]

### 7.2.2 Parametry motoru MF 021050

Maximální vnější rozměry	Ø230 x 149			mm
Stálý krouticí moment	41,1			Nm
Max. krouticí moment	305,7			Nm
Setrvačnost motoru	0,01			kg · m <sup>2</sup>
Hmotnost motoru	7,61			kg
Typ	A	B	C	-
Použité napětí	48	150	300	V
Max. proud	455,4	165,6	140,1	A
Otáčky naprázdno	658	748	1266	ot · min <sup>-1</sup>
Maximální výkon	21,1	23,9	40,5	kW

Tabulka 8 - Parametry elektromotoru Megaflux MF 021050 [23]

Podle velikosti, hmotnosti a podle napájecího napětí robotu, které používá a na které byl navrhnout, použijeme jeden ze tří typů motoru A, B nebo C.

### 7.2.3 Použití elektromotoru pro brzdění

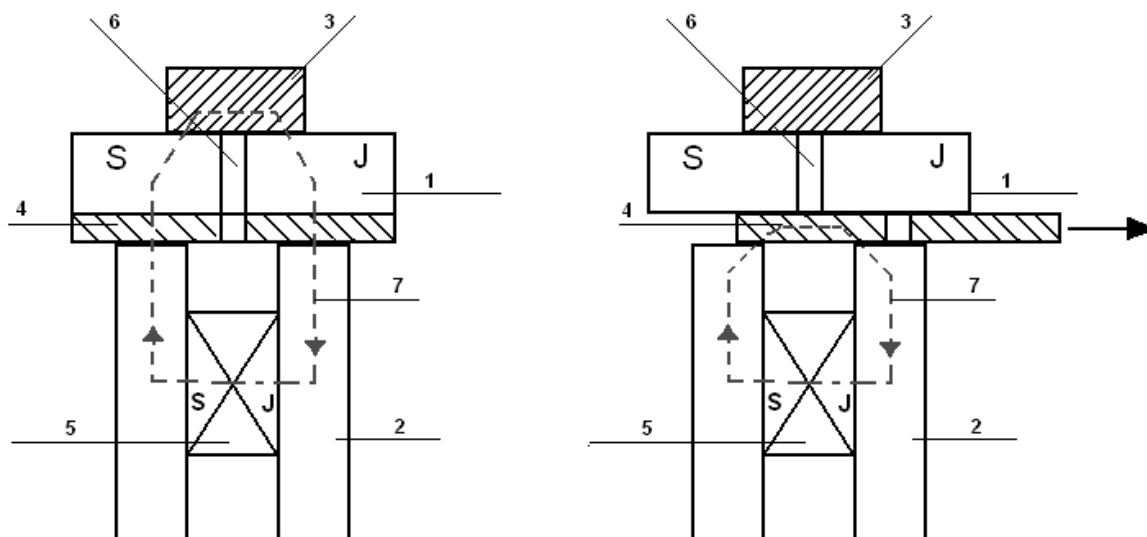
Ať už bude pohon zabudován v robotu nebo automobilu, vždy je potřeba hledět na spotřebu energií. Ta by měla být co nejnižší, o to se starají stále účinnější elektromotory, atd. Při uvedení vozidla nebo robota do pohybu mu je udělena kinetická energie, která by v případě obyčejného brzdění byla převedena na teplo a zmařena. Proto je vhodné tuto kinetickou energii zpětně využít. Toho se dá v případě elektronicky komutovaného motoru jako v tomto případě snadno docílit. Elektromotor může v tomto případě brzdit elektrodynamicky nebo v rekuperačním, generátorickém režimu. Jak už bylo uvedeno, je nejvhodnější brzdit pomocí rekuperace, kdy se elektrická energie vrací zpátky do akumulátoru. Elektromotor v tomto případě přejde z motorového do generátorového režimu. Pro toto brzdění je zapotřebí řídicí elektroniky, frekvenčního měniče, regulátoru napětí, atd. Díky rekuperačnímu brzdění je ovšem možné zvýšit účinnost a dojezd robotu. V případě větších a těžších robotů se tímto brzděním také šetří mechanické brzdy. Generátorické brzdění nastane při roztočení motoru nad synchronní otáčky. Z motoru se stává generátor. Moment motoru při něm působí proti směru otáčení rotoru, než klesnou otáčky pod synchronní, aby se tak nestalo, je použit frekvenční měnič, který postupně snižuje frekvenci. Poté se energie zpětně ukládá. Lze použít i elektrodynamické brzdění, kde se na rotor přivede stojící stejnosměrné napětí. To vyvolá moment působící proti směru otáčení motoru. Díky tomu lze vytvořit moment i při nulových otáčkách. [28]

## 7.3 Spojka

Pro přenesení krouticího momentu z elektromotoru na kolo robotu je v tomto případě nutné použití nějakého druhu spojky. V tomto případě jde o to, aby spojka neměla příliš vysokou spotřebu energie. Klasická elektromagnetická lamelová spojka se kvůli své vyšší spotřebě energie nehodí. Z toho důvodu je zde jako spojka použito magnetické sklíčidlo, které se používá k upínání obrobků na soustruh společně s ocelovým protikusem použitým zde jako lamela. Firma poskytující tato sklíčidla v ČR neshledala problém s použitím sklíčidla jako spojky. Jsou tři druhy těchto sklíčidel, první druh funguje pouze na mechanickém principu a využívá permanentní magnety. Druhý je elektromagnetický, zapínání a vypínání takového sklíčidla funguje stejně jako elektromagnetická spojka. Třetím druhem je sklíčidlo s elektro-permanentními magnety, kdy se pro zapnutí a vypnutí používají pouze impulzy. Vhodné pro použití do pohonu s minimálními nároky na energii jsou první a třetí druh. Dále bude detailněji popsán princip fungování a schéma vnitřní části těchto sklíčidel.

### 7.3.1 Sklíčidlo s permanentními magnety

Toto sklíčidlo je samo o sobě bez jakéhokoliv nároku na elektrickou energii. Tyto sklíčidla používají pro vyvození upínací síly permanentní magnety. Ty jsou z různých materiálů, v dnešní době se nejvíce používají tzv. neodymové magnety. Výhodou tohoto systému je, že se v aktivním stavu nijak nezahřívá. Permanentní sklíčidlo je nezávislé na energii, ale kvůli nemožnosti ho uvést ručně do zapnutého stavu při použití uvnitř pohonu je potřeba počítat s napájením jeho ovládání. Ovládání by mělo mít dva stavy, zapnuto, vypnuto. Jedním z hlavních nedostatků je právě nutnost ovládání, které bude mechanicky přepínat dva stavy. Uvnitř sklíčidla je potřeba posunout tzv. zkratovací planžetu s feromagnetického materiálu. Ta je v prostoru mezi pólovou deskou, což je horní část sklíčidla a permanentními magnety. Planžeta funguje tak, že ve vypnutém stavu jdou magnetické indukční siločáry přes tuto planžetu od severního magnetického pólu k jižnímu magnetickému pólu a nevystupují přes pólovou desku do upínaného materiálu. Při přepnutí do stavu zapnuto je planžeta posunuta tak, aby magnetické indukční siločáry procházeli od severního magnetického pólu magnetu k jižnímu přes pólovou desku, na níž je položen upínaný materiál. Při vypnutí je vhodné upínaný materiál odmagnetovat, aby nežádoucím způsobem neovlivňoval pohon. Při zapnutí není pohon ovlivněn, protože se magnetické indukční siločáry uzavírají přes upínaný materiál a nevystupují do prostoru. [29]



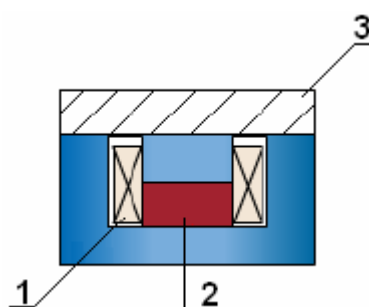
Obrázek 18 - Princip permanentního magnetického upínače - zapnuto, vypnuto [29]

**Popis obrázku:** (1 - pólová deska, 2 - pólové nástavce, 3 - obrobek, 4 - zkratovací planžeta, 5 - magnet, 6 – nemagnetická spára, 7 - tok magnetických indukčních čar)

### 7.3.2 Sklíčidlo s elektro-permanentními magnety

V tomto případě je jako spojka použito sklíčidlo s elektro-permanentními magnety. Ty jsou vlastně jakýmsi hybridem mezi permanentními magnety a elektromagnety. K aktivaci je zapotřebí elektrické energie, ale na rozdíl od elektromagnetů jde u elektro-permanentních magnetů pouze o impuls nebo impulzy. Ty trvají v řádech milisekund. Po poslání tohoto proudového impulsu se takový elektro-permanentní materiál nasytí, většinou se jedná o neodym, a stává se zdrojem ustáleného, permanentního magnetického toku. Při přiložení feromagnetického materiálu dojde k upnutí, v tomto případě vlastně sepnutí spojky. Pro deaktivaci se používá také impuls, oproti aktivacímu je opačně orientovaný. V případě permanentních magnetů může nastat problém s odmagnetováním upínaného materiálu. Zde se materiál odmagnetuje vhodným proudovým impulzem společně se sklíčidlem. Je potřeba použít řídicí elektroniku, která ovládá velikost proudových impulsů pro magnetizaci a demagnetizaci. Výhodami je nízká spotřeba energie, v aktivním stavu se sklíčidlo nezahřívá, při výpadku napájení drží a nedojde k uvolnění. Hlavní nevýhodou takovýchto sklíčidel je vyšší cena, kvůli nutnosti použití řídicí elektroniky a náročnějších napájecích zdrojů. Takovéto zdroje jsou důležité k nasycení magnetů, protože potřebují dvou až čtyřnásobnou intenzitu proudu oproti obyčejným elektromagnetům. Vhodnou možností je použití kondenzátorových baterií nebo

silného zdroje pro vytvoření impulsu o vysoké proudové špičce. Těmito kondenzátory ani bateriemi, stejně jako použitou řídicí elektronikou se tato diplomová práce nezabývá. Dnes už je na výběr z mnoha takových to sklíčidel, je zde možnost i výroby na zakázku. Princip funkce je takový, že při vypnutém stavu nejsou permanentní magnety uvnitř nasyceny, mají nižší intenzitu magnetického pole a indukční magnetické siločáry se uzavírají od severního k jižnímu pólu magnetu uvnitř. Při poslání proudového impulsu do cívky se permanentní magnet nasytí, zvýší se intenzita indukčních magnetických siločar a ty se začnou uzavírat vně, přes upínaný feromagnetický materiál. Pro vypnutí se vyše opačný impuls a ten „zkratuje“ magnetický tok a indukční magnetické siločáry se vrátí zpět dovnitř. [29]



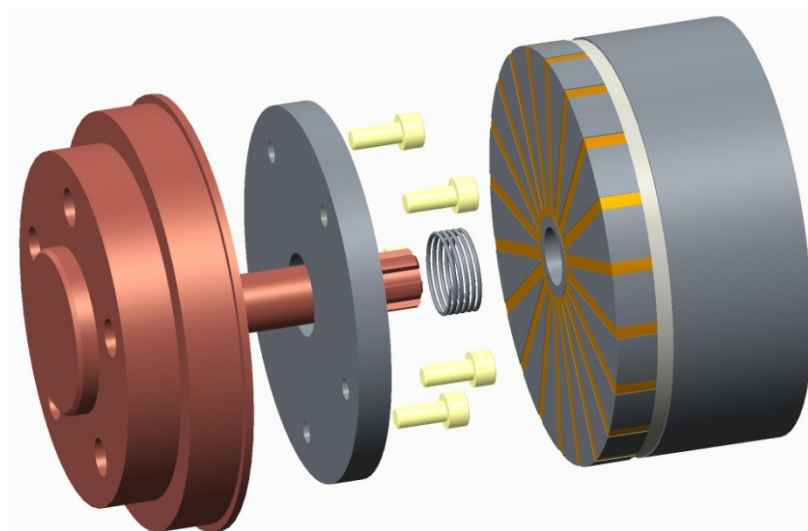
Obrázek 19 - Schéma elektro-permanentního upínače [29]

**Popis obrázku:** (1 – cívka, 2 – permanentní magnet, 3 – upínací materiál)

### 7.3.3 Popis spojky použité v pohonu kola

Spojka se zde skládá ze třech hlavních částí. Funkční část tvoří sklíčidlo s elektro-permanentními magnety, které k sobě přitahují ocelový disk. Ten je vložen v přírubě, na kterou se připevní kolo robotu. Disk je spojen s přírubou pomocí pěti šroubů. Součástí spojky je i pružina, nasazená na hřídel vycházející z příruby kola. Ta zajišťuje v případě, že je sklíčidlo vypnuté odtlačování příruby kola od sklíčidla, tak aby mezi nimi byla malá mezera umožňující volné otáčení, aniž by se součásti dotýkali a třeli o sebe. Pólová deska má předepsanu maximální možnou míru opotřebení. Při zapnutí dokáže sklíčidlo vyvinout upínací sílu  $180 \text{ N/cm}^2$ . Pro vyvinutí maximální možné upínací síly je ocelový disk broušený, aby byly minimalizovány vzduchové mezery vytvořené nástrojem při obrábění. Velká drsnost znamená velké vzduchové mezery, tím se snižuje hustota indukčních magnetických siločar spojujících se přes ocelový disk. To pak má za následek nižší upínací sílu. Sklíčidlo potřebuje pro zapnutí proudový impuls o velikosti max. 30A. Součástí nutnou k připojení spojky je rotační translátor, ten zajistí volné otáčení napájecího kabelu, tak aby nedošlo k ukroucení tohoto kabelu při otáčení elektromotoru.

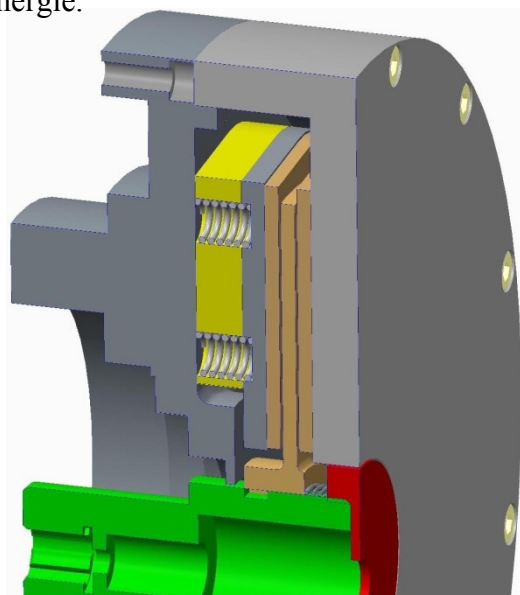


*Obrázek 20 - Spojka v rozloženém stavu*

## 7.4 Brzda

Jak už bylo uvedeno výše, je zde možnost brzdění elektromotorem, který umožňuje brzdít pomocí rekuperace kinetické energie nebo elektrodynamicky. Primárně je brzděno právě tímto pohonem. Ovšem z důvodu možnosti odpojení pohonu od kola při poruše nebo pro možnost stání na místě bez nutnosti držení momentem motoru a tím pádem bez spotřeby elektrické energie je v pohonu zakomponována také mechanická brzda. Jedná se o kotoučovou brzdou, která je pro tento pohon speciálně sestavena. Ovládá se pomocí elektro-permanentních magnetů, ty ovšem neslouží k zabrzdění brzdy, ale k její deaktivaci. Brzda je v podobném provedení, jako v případě brzdy s plovoucím třmenem. To znamená, že jedna brzdňá destička je na pevně a druhá je pohyblivá. V aktivním stavu je pohyblivá destička přitlačována na ocelový kotouč, ten se díky tomu posune směrem ke druhé destičce. Při dotlačení pohyblivé destičky na kotouč a následně na pevnou destičku vznikne tření, díky němuž brzda brzdí. Pohyblivá destička je v aktivním, zabrzděném stavu přitlačována na kotouč pomocí šesti pružin, dohromady vyvozující sílu 300 N. Pro deaktivaci brzdy jsou použity dva elektro-permanentní magnety. Každý z nich o upínací síle 160 N, dohromady tedy 320 N pro překonání síly pružin. Po zapnutí magnetů dojde k přitažení pohyblivé brzdové destičky a brzda se odbrzdí. Po odbrzdění je potřeba zařídit, aby se kotouč vrátil do své původní polohy tak, aby se neotíral o pevnou nebo pohyblivou brzdňou destičku, čímž by docházelo opět k mírnému brzdění. K tomu je použita pružina, která po přitažení pohyblivé brzdňé destičky odtlačí kotouč od pevné destičky, ten je pak z druhé strany zastaven dorazem. Tím dojde k vymezení vůle mezi brzdňými destičkami a ocelovým kotoučem. Ovládání je zde stejně jako u sklíčidla řešeno pouze pomocí jednotlivých proudových impulsů nutných k aktivaci a deaktivaci přídržných elektro-

permanentních magnetů ovládajících brzdu. Díky tomu má brzda velmi nízké nároky na spotřebu elektrické energie.

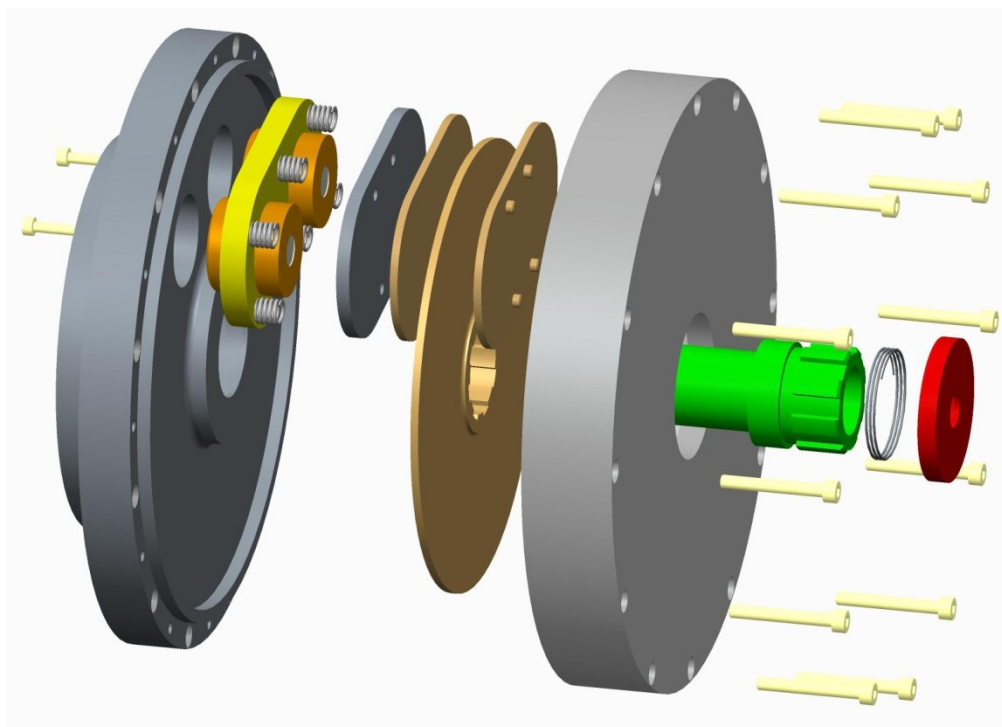


*Obrázek 21 - Řez kotoučovou brzdou*

#### **7.4.1 Popis brzdy použité v pohonu kola**

Kotoučová brzda se zde skládá z několika funkčních částí. Třmen brzdy a tedy nosič brzdových destiček zde není jako u klasické kotoučové brzdy, ale je tvořen dvěma samostatnými kruhovými segmenty. První kruhový segment je zároveň jakýmsi rámem motoru, kde z jedné strany uzavírá všechny funkční části pohonu uvnitř tohoto rámu a z druhé strany jsou k němu pomocí šroubu připojeny dva elektro-permanentní upínací magnety nutné k ovládání brzdy. Na nich je nasazena distanční podložka s vodícími dírami pro pružiny přitlačující pohyblivou část brzdy. Aby mohly magnety přitáhnout materiál, musí být z feromagnetického materiálu. Proto je na distanční podložku a na magnety nasazen držák brzdového špalku z oceli. Do držáku brzdového špalku je usazena brzdová destička. Brzdová destička se dá v případě nadměrného opotřebení vyměnit. Druhý kruhový segment tvořící „třmen“ je nosičem druhého brzdového špalku, krytem uzavírajícím brzdou a zároveň nosnou částí celého pohonu, kterým je pohon připojen k zavěšení vozidla. Mezi oběma brzdovými špalky je vložen kotouč brzdy, ten je opatřen osazením s drážkováním. Kotouč je nasunut na duté hřídeli s vnějším drážkováním z jedné strany a s vnitřním drážkováním, ze strany druhé. Tato dutá hřídel je nasazena na drážkovanou hřídel vycházející z příruby kola a je sní spojena pomocí šroubu. Takto dochází k přenosu krouticího momentu z kola, přes dutou hřídel na kotouč brzdy. Při zabrzdění brzdy je tedy kolo zastaveno a robot stojí. Posledními součástmi brzdy jsou poté

ještě pružina, která po odbrzdění brzdy vrací kotouč do původního stavu a pojišťovací matice držící tuto pružinu a uzavírající zbytek brzdy před vnikáním větších nečistot.



Obrázek 22 - Rozložené komponenty brzdy

#### 7.4.2 Ovládání brzdy

Stejně jako v případě ovládání spojky je brzda ovládána pomocí elektro-permanentních magnetů vyžadujících krátký proudový impulz nebo impulzy. Po přivedení proudového impulzu dojde k nasycení permanentního magnetu uvnitř a vznikne magnetické pole, které přitáhne držák brzdného špalku a brzda se odbrzdí. Pro deaktivaci brzdy je potřeba opačného proudového impulzu, který magnet „vyzkratuje“, dojde k deaktivaci magnetického pole a pružiny přitlačí špalky na kotouč, tím dojde k zabrzdění. Pro ovládání je možno použít napájecí zdroj a řídicí elektroniku sklíčidla. Pro tyto menší magnety není zapotřebí tak velkého proudového impulzu jako v případě sklíčidla. [29]

#### 7.4.3 Režimy brzdění

Pohon je schopný brzdít dvěma různými brzdami, jednou je brzdící elektromotor a tou druhou je mechanická kotoučová brzda. Jak již bylo uvedeno výše, primárně se brzdí elektromotorem a to pomocí rekuperačního brzdění, kdy je kinetická energie přeměněná na energii elektrickou a ta je pak vrácená zpět do akumulátoru. Toto je užitečné pouze v případě zapnuté spojky, což bude ve většině času používání robotu. V případě poruchy pohonu je spojka odpojena a poté je potřeba brzdít mechanickou kotoučovou brzdou. Ta

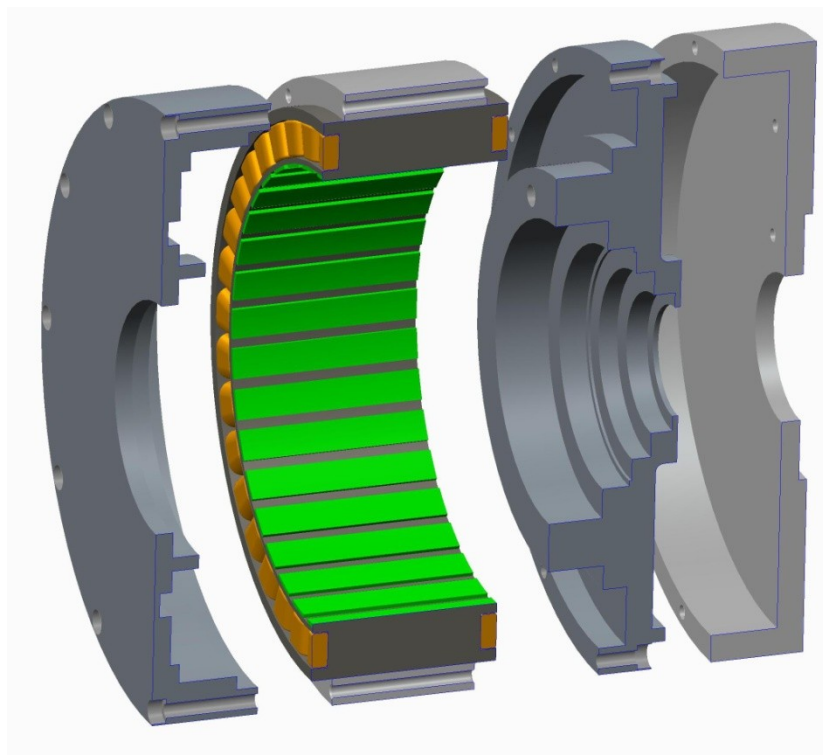
nemá tak vysokou účinnost, ale používá se k brzdění buď při poruše pohonu, nebo při rozepruté spojce. Primárně je brzda použita pouze pro stání robotu a slouží jako bezpečnostní.

## 7.5 Nosná konstrukce částí pohonu

Nosná konstrukce pohonu se skládá z vnější části, obalu, který vše uzavírá uvnitř a zároveň nese konstrukční prvky použité uvnitř. Vnější částí je poté pohon připojen k podvozku robotu nebo vozidla.

### 7.5.1 Vnější část nosné konstrukce

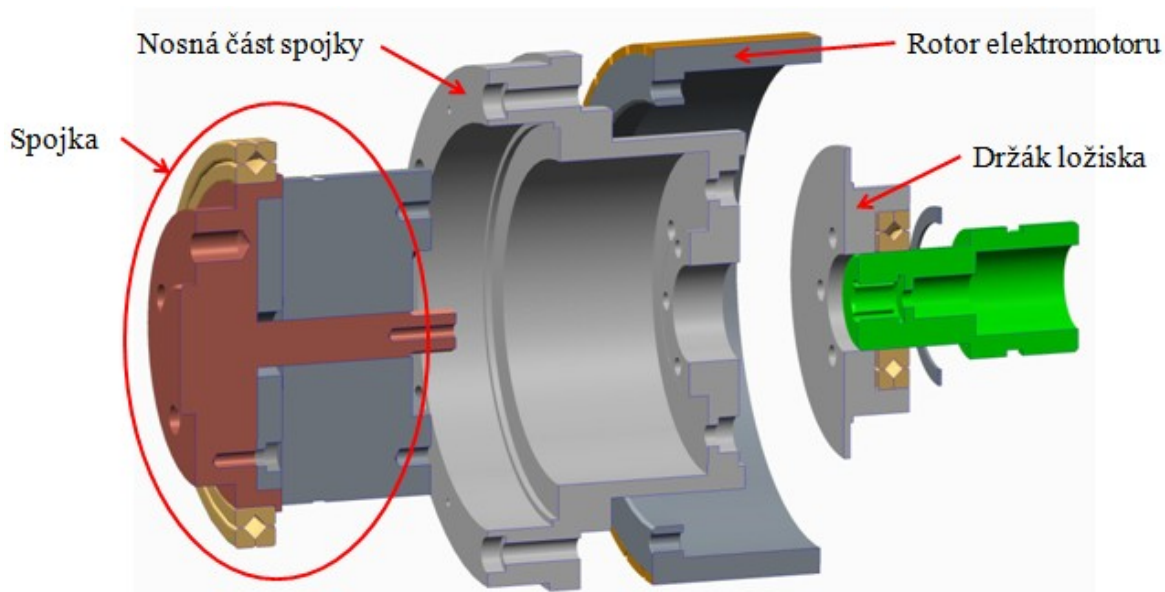
Vnější část se skládá ze čtyř samostatných celků spojených k sobě pomocí šroubů. Úplným základem, od kterého se vše odvíjí, je prstencový rám motoru, který je součástí statoru a je s ním pevně spojen. Na něj jsou pomocí šroubů připojeny z jedné i druhé strany kryty motoru, sloužící také jako jeho rám, jsou z hliníkové slitiny. Uzavírají prostor elektromotoru a spojky a chrání jej před vnějšími vlivy. Kryt motoru ze strany od zavěšení je zároveň nosičem pro jednu část brzdového třmene. Na tento kryt navazuje další část, jedná se o nosnou část celého pohonu, kterým je pohon připojen k podvozku robotu nebo vozidla. Slouží také k zakrytí brzdy a tvoří druhou část třmene brzdy. Je také vytvořen z hliníkové slitiny a je ke zbytku pohonu připojen pomocí šroubů.



Obrázek 23 – Rozložená vnější část nosné konstrukce

### 7.5.2 Vnitřní část nosné konstrukce

Vnitřní část nosné konstrukce se zde také odvíjí od elektromotoru. Na osazení rotoru elektromotoru je pomocí šroubů připevněna nosná část spojky. Je z hliníku a je uzpůsobena tak, že do jejího vnitřního průměru je spojka vložena a připevněna pomocí pěti šroubů. Poté je na nosnou část spojky připojen pomocí šroubů také držák ložiska. To je součást mající na vnitřním i vnějším průměru nasunuta ložiska pro dvě různé možnosti otáčení kola. Otáčení pomocí motoru nebo volné otáčení.

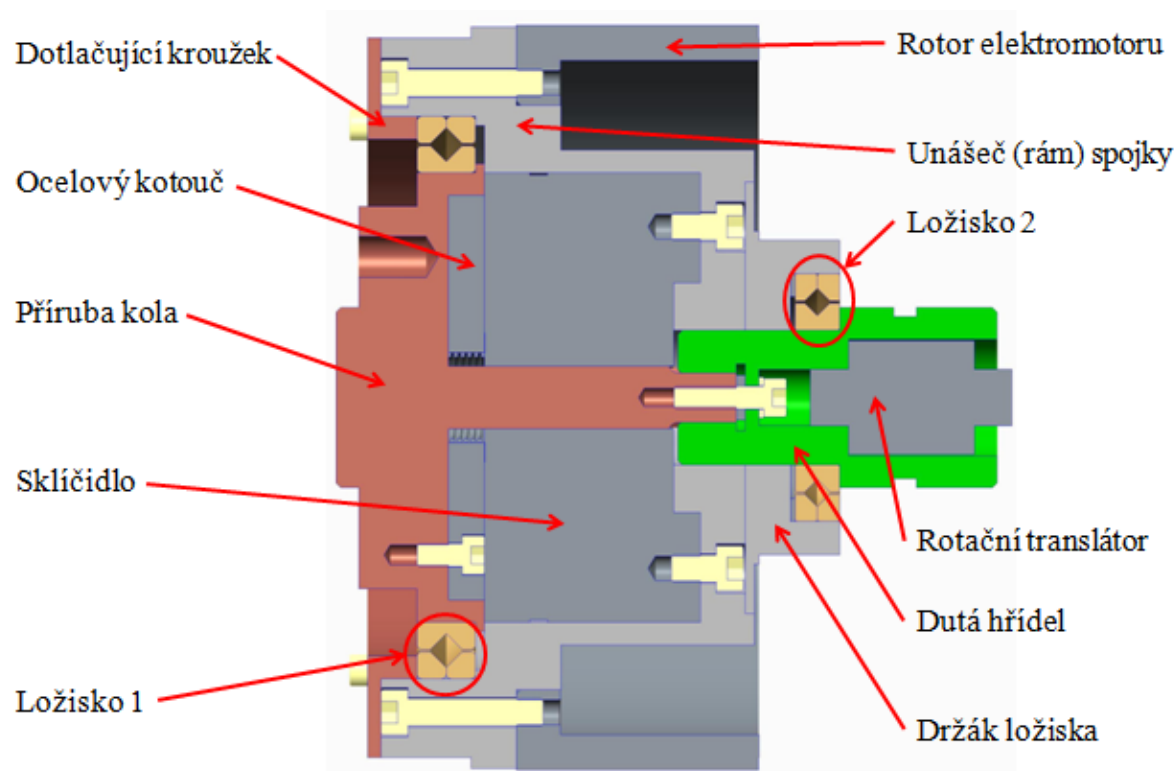


Obrázek 24 - Rozložená vnitřní část nosné konstrukce

### 7.6 Montáž pohonu

Nejdříve je potřeba smontovat dohromady vnitřní části pohonu. Začne se vložením ocelového kotouče do příruby kola a vše připevní pomocí šroubů. Poté se na hřídel vycházející z příruby kola nasune pružina zajišťující odtlačování příruby od sklíčidla. Tato hřídel se poté vsune do díry ve sklíčidle. Na přírubu kola je také nasazeno ložisko se zkříženými válečky. Tento celek se poté vloží do unášče (rámu) spojky. K unášči se spojka připevní pomocí šroubů. Ty jsou zapuštěny tak, aby nebránili přiložení držáku ložiska, který je poté taky připevněn šrouby k unášči spojky. Do díry držáku ložiska se vloží distanční kroužek. Poté je potřeba nalisovat ložisko na dutou hřídel, která slouží ke spojení s přírubou kola a zároveň nese kotouč brzdy. Tato hřídel je z jedné strany opatřena vnitřním drážkováním. Z druhé strany je díra, do které se vloží šroub s podložkou, ta je průchozí až na stranu drážkování, proto šroub z téhle strany vyleze. Na tento šroub se umístí vymezující kroužek. Tento celek se poté vloží dovnitř držáku ložiska, než se tak

stane je potřeba protáhnout přes dutou hřídel (unášec brzdy) kabel vedoucí ze sklíčidla, připravenou dírou v duté hřídeli. Tu je potřeba nasadit tak, aby do sebe zapadali společně s drážkováním příruby kola. Posléze přitáhnout dříve prostrčený šroub. Krouticí moment je pak přenášen pomocí tohoto drážkování směrem k brzdě. Kabel prostrčený uvnitř duté hřídele se připojí k rotačnímu translátoru, aby se při otáčení neukroutil. Na vnější část unášeče spojky se pomocí šroubů připevní rotor elektromotoru. Šrouby jsou v tomto případě zapuštěny, tak aby bylo možné přiložit kroužek dotlačující první ložisko. Kroužek je k rámu unášeče spojky připevněn pomocí šroubů. Tímto je vnitřní část pohonu umožňující volné otáčení kola při vypnuté spojkě a tudíž odpojeném motoru hotová.

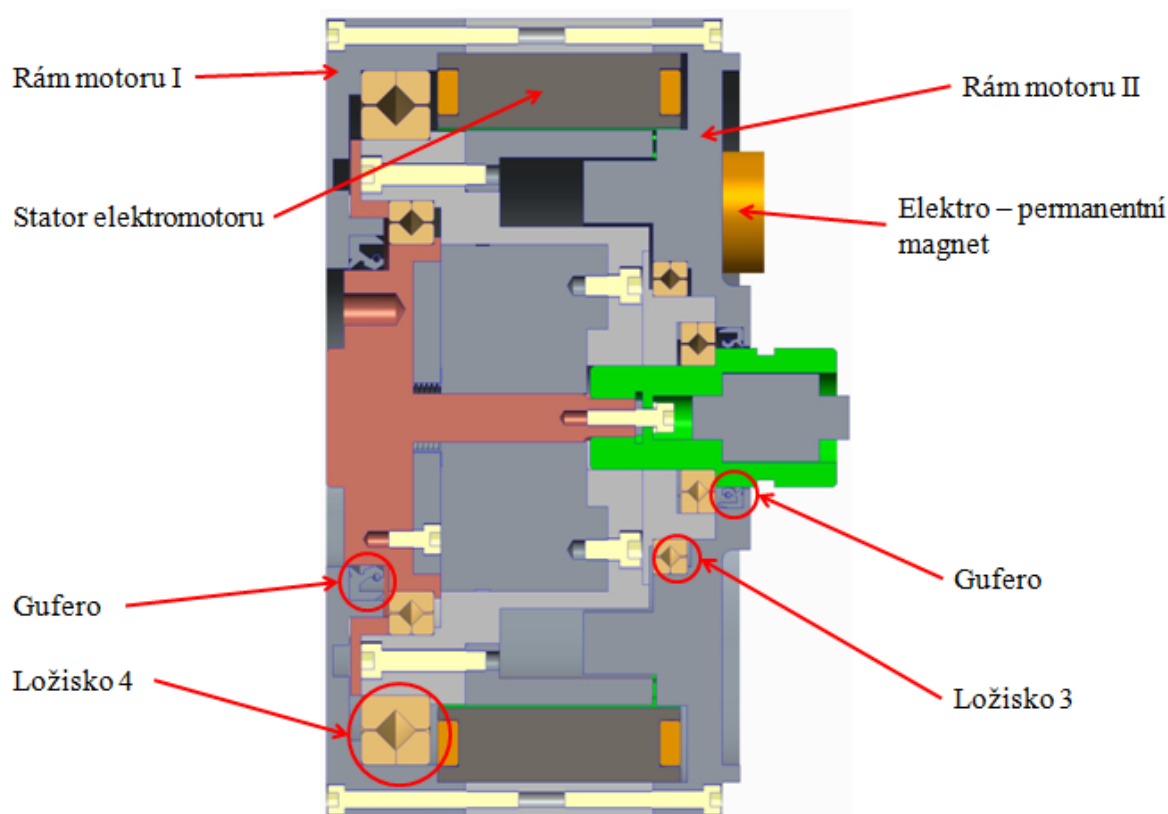


Obrázek 25 - Popis složené vnitřní části pohonu

Aby se vnitřní složená část mohla celá dohromady otáčet, když je zapnutá spojka a tudíž kolo mohl pohánět nebo brzdit elektromotor je zapotřebí nalisovat z obou stran ložiska. Ložisko 3 se nalisuje na unášec (rám) spojky a ložisko 4 zase na držák ložiska. Obě ložiska jsou se zkříženými válečky. Dále se připojí rám motoru II pomocí šroubů k prstenci statoru elektromotoru, do tohoto rámu se umístí gufero. Na rám motoru II je zapotřebí umístit do připravených otvorů dva elektro-permanentní magnety a přidělat je šrouby. Nyní se do rámu motoru II vsune na doraz celá složená vnitřní část. Další gufero se umístí do rámu motoru I a poté se i z druhé strany motor pomocí šroubů připojí k prstenci elektromotoru. Tím je smontována a uzavřena spojka společně s elektromotorem uvnitř

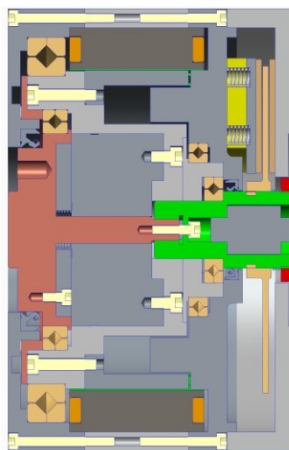


pohonu. Tato část je z obou stran chráněna před vnějšími vlivy, hlavně vnikáním nečistot a vlhkosti díky použití gufer.



Obrázek 26 - Složená vnější část bez kotoučové brzdy

Ke složení celého pohonu je zapotřebí přidělat už pouze součásti kotoučové brzdy. Na elektro-permanentní magnety je nasazena distanční podložka s šesti dírami, do kterých jsou vloženy přitlačné pružiny. Poté je vhodné aktivovat magnety a na pružiny přiložit ocelovou destičku držící brzdny špalek. Destička se přichytí k magnetům a brzda bude ve stavu vypnuto, tedy odbrzděna, jednodušší pro případ montáže. Pak přichází na řadu nasazení brzdového kotouče na vnější drážkování unášече kotouče (dutá hřídel). Kotouč je potřeba nasunout na doraz tvořený osazením na hřídeli. Zkontrolovat odsazení kotouče od brzdového špalku, odsazení je možné doladit pomocí šroubu upevňujícího k sobě unášеч kotouče. Pro odtlačení kotouče při odbrzdění a jeho centrování je zapotřebí na hřídel nasunout pružinu, která to zařídí a tu posléze zajistit pojišťovací maticí. Na kryt brzdy a zároveň součást, kterou je pohon připojen v podvozku je potřeba přidělat nasunutím druhý brzdový špalek. Kryt brzdy se pak pomocí šroubů přišroubuje ke zbytku pohonu. Tento kryt chrání vnitřní část brzdy a zabraňuje vniknutí větších nečistot dovnitř pohonu.



Obrázek 27 - Kompletně složený pohon

## 7.7 Řešení potřebná pro bezpečné fungování pohonu

Pro bezproblémové a bezpečné fungování pohonu je zapotřebí několika specifických požadavků, které jsou zde vysvětleny.

### 7.7.1 Nezávislé brzdy

Jak již bylo uvedeno výše, je v pohonu potřeba dvou na sobě nezávislých brzd. Toho je docíleno pomocí brzdění elektromotorem a při jeho odpojení nebo výpadku mechanickou kotoučovou brzdou. Kotoučová brzda je použita primárně pro stání na místě.

### 7.7.2 Použití čtyř ložisek

V pohonu jsou ložiska namáhány jak radiálními, tak axiálními silami. Vzhledem k malému zástavbovému prostoru a kvůli maximální úspoře místa jsou zde i přes svou vysokou cenu použity čtyři ložiska se zkříženými válečky. Ložiska jsou funkční ve dvou párech, kdy při zapnuté spojce a práce elektromotoru jsou dvě vnitřní ložiska zastavena a celá vnitřní část pohonu se otáčí na vnějším páru ložisek. Při poruše motoru nebo prostě jen vypnuté spojce, z důvodu potřeby volného otáčení kola, se dokáže otáčet na vnitřním páru ložisek. Pokud není v poruše motor, je možnost, že se budou otáčet i vnější ložiska. Pokud by byl požadavek tomuto zabránit je možné zabudovat do pohonu ještě bubnovou brzdou do volného prostoru mezi rotorem elektromotoru a vnější částí unášече spojky.

### 7.7.3 Použití rotačního translátoru

Jeho použití je nutné k bezproblémovému fungování spojky. Ta se může uvnitř pohonu otáčet a tak je nutné zajistit, aby nedošlo k ukroucení kabelu, který je k pohonu přiveden. Kabel je od spojky k translátoru připojen díky drážce v duté hřídeli.



## **7.8 Možnosti, čím se dále zabývat při řešení pohonu**

V případě této diplomové práce se jedná pouze o konstrukční návrh pohonu integrovaného do kola. Při možnosti realizace nebo pro detailnější prozkoumání možností takového pohonu by bylo potřeba vyřešit ještě mnoho dalších věcí. Některé jsou zde pro příklad uvedeny.

### **7.8.1 Deformační analýzy a optimalizace jednotlivých součástí**

Před realizací pohonu je potřeba vědět na jakém typu podvozku bude uchycen a jak bude uchycen. Od toho by se posléze odvíjeli deformační analýzy jednotlivých funkčních součástí. Po deformačních analýzách by následovala rozměrová a tvarová optimalizace. Důležitým faktorem je co nejnižší hmotnost pohonu, jelikož by se ve většině případů jednalo v případě pohonu o neodpruženou hmotnost, která zhoršuje jízdní vlastnosti všech vozidel.

### **7.8.2 Připojení pohonu k podvozku vozidla, robotu**

Další možností k řešení je uchycení pohonu na vozidlo nebo robota. V případě použití v kole jakéhokoliv vozidla, by se s největší pravděpodobností jednalo o přírubu, která by se speciálně upravovala podle toho na jaké vozidlo je potřeba pohon připojit. Ať už by se jednalo o nezávislé, více prvkové zavěšení u automobilu nebo podvozek rocker-bogie používající robotická vozítka na Marsu.

### **7.8.3 Zahřívání a možnosti chlazení**

V pohonu je použit elektromotor, který je možno dlouhodoběji a vysoce přetížít. V důsledku toho má vysoký proudový odběr a to způsobuje značný nárůst teploty ve vinutí a tím oteplování celého pohonu. Spojka a ovládání brzdy vyžaduje pouze proudové impulzy pro aktivaci a deaktivaci ovládacích magnetů, ty jsou proto v obou stavech chladné. Aby ovšem teplota vinutí elektromotoru neovlivňovala tyto a ostatní systémy je vhodné řešit nějakým způsobem chlazení pohonu. Mohlo by se jednat o chlazení např. pomocí žebrování, při jízdě přivedení proudícího vzduchu k pohonu nebo aktivní vodní chlazení napojené na pohon. Vzhledem k více možnostem by bylo vhodné dále řešit, jaký systém by byl pro použití v pohonu nejvhodnější. V případě použití vodního chlazení by záleželo na možnostech připojení takového chlazení k vozidlu.

#### 7.8.4 Použití v automobilu

Pro případ použití v osobním automobilu by bylo nejvhodnější vyřešit jiným způsobem mechanickou brzdu. Nejpravděpodobněji by se mělo jednat o klasickou kotoučovou brzdu ovládanou pomocí hydraulické kapaliny. V případě většího automobilu by se také dal zaměnit pohon i spojka za větší a výkonnější kus, možnost modulární stavby.

#### 7.8.5 Napájení pohonu

Řešení napájení v případě výpadku nebo vybití hlavního zdroje. V případě, že by se s hlavním zdrojem stalo něco neočekávaného, by nebyla možnost ovládat pomocí impulzů elektro-permanentní magnety. Z toho důvodu by bylo vhodné řešit buď samostatný, speciální akumulátor pro ovládání těchto magnetů nebo záložní zdroj umožňující jejich vypnutí, popřípadě zapnutí.

#### 7.8.6 Požadavky na řídicí jednotku

Před zahájením výroby je potřeba vyřešit požadavky na řídicí jednotku pohonu. Musí být schopna vypočítat velikost proudového impulsu pro namagnetování a odmagnetování elektro-permanentních magnetů a jakou silou mají působit. Musí umět plynule ovládat a měnit otáčky a moment motoru.

### 7.9 Pohon kola umístěný v náboji kola

Zde je vidět celkový pohled na pohon umístěný v náboji kola. Pro představu jde o klasické automobilové kolo. Rozměr ráfku je v tomto případě 15" a šířka kola je 195 mm. Pohon se tedy se svými maximálními rozměry  $\varnothing 230 \times 149$  mm zcela vejde do vnitřního prostoru kola.



*Obrázek 28 - Kompletní pohon umístěný v 15" kole*

## 8 Výpočet a kontrola vybraných částí pohonu

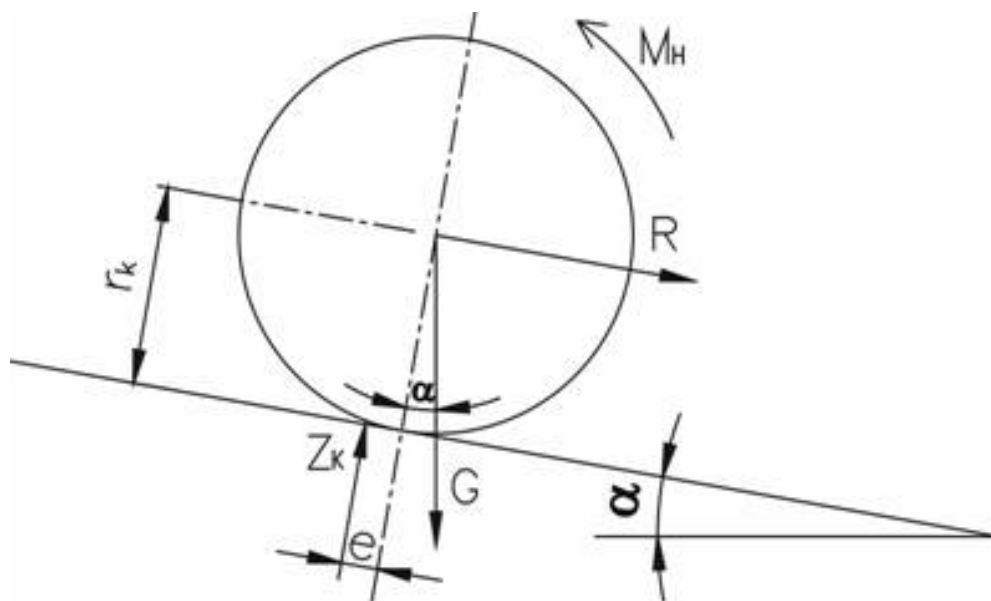
V této kapitole je proveden výpočet pohonu, jeho rychlostí, zrychlení a krouticích momentů při určitém zatížení kola. Tento pohon je možné použít jak v robotu tak např. v malém vozidle proto je proveden výpočet pro tři různá zatížení.

### 8.1 Hmotnost a síly působící na pohon

Hmotnost celého pohonu včetně ráfku s pneumatikou zjistíme pomocí 3D programu PTC Creo. Samostatná hmotnost kompletního pohonu je tedy 21,7 kg. Celková neodpružená hmotnost včetně ráfku a pneumatiky je 28,7 kg. Vzhledem k možnosti použití v kolech různých robotů i menšího automobilu, bude proveden výpočet pro různé zatížení. Pro případ použití ve čtyřkolovém robotu o hmotnosti 300 kg. V šestikolovém robotu o hmotnosti 900 kg a v automobilu o hmotnosti 1200 kg. Počítá se všemi poháněnými koly a rozložením hmotnosti na všechny kola stejně. Tudíž bude výpočet zatížení možno převést na jedno kolo. Na pohon tedy budou působit síly 75 kg, 150 kg a 300 kg.

### 8.2 Metodika návrhu pohonu

Pro navrhování a dimenzování pohonu se pro kolový podvozek vychází z metodiky návrhu pohonů u motorových vozidel. V této kapitole jsou popsány a odvozeny parametry potřebné k volbě a návrhu pohonu. Z obrázku 29 pak lze odvodit obecnou pohybovou rovnici přímočarého pohybu vyjadřující síly a momenty působící na kolo. [2]



Obrázek 29 - Síly a momenty na poháněném kole [2]

Pro podmínky rovnováhy momentů působících na poháněném kole platí:

$$\sum M = 0 \quad (1)$$

Tato rovnice se dá dále rozepsat:

$$\sum M_H = Z_K \cdot e + R \cdot r_K \quad (2)$$

- kde  $M_H$  - je hnací moment působící na jedno kolo,  
 $Z_K$  - je radiální reakce podlahy,  
 $e$  - je excentricita radiální reakce terénu  $Z_K$   
 $R$  - je součet všech jízdních odporů působících  
 proti směru jízdy s výjimkou valivého  
 odporu zahrnutého v členu  $Z_K \cdot e$  ,  
 $r_K$  - je valivý poloměr kola.

Hnací moment se převede na hnací sílu:

$$F_H = \frac{M_H}{r_K} \quad (3)$$

kde  $F_H$  - je hnací síla

### 8.2.1 Jízdní odpory

Jsou síly působící proti pohybu kola, a proto výsledná síla pohonu musí překonat součet všech těchto jízdních odporů, působících na kolo.

Hnací síla pohonu musí překonávat tyto jízdní odpory:

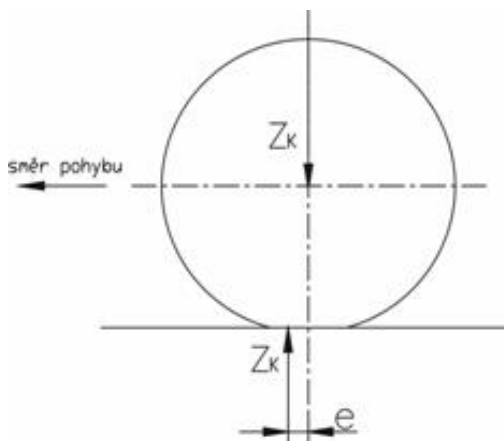
$$F_H = O_f + O_v + O_s + O_z \quad (4)$$

- kde  $O_f$  - je valivý odpor  
 $O_v$  - je vzdušný odpor  
 $O_s$  - je odpor stoupání  
 $O_z$  - je odpor zrychlení

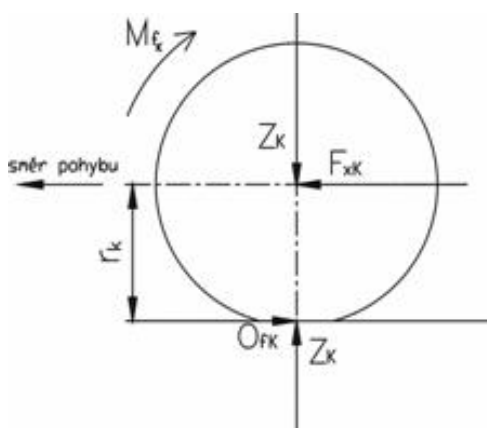
Valivý a vzdušný odpor působí vždy proti pohybu vozíku. Při zrychlení musí vozík překonat odpor zrychlení a při jízdě do svahu odpor stoupání. [2]

#### 8.2.1.1 Valivý odpor

Ten vzniká při deformaci obryse kola, či pneumatiky a také při deformaci terénu. Je-li dostatečně tuhý povrch, pak dochází k deformaci pouze pneumatiky na kole. Radiální reakce terénu  $Z_K$  je předsunuta před osu kolmou k terénu o excentricitu  $e$  jak je znázorněno na obrázku 30. Platí, že reakce  $Z_K$  je stejně velká jako zatížení kola. [2]

Obrázek 30 - Radiální reakce terénu  $Z_K$  [2]

Z tohoto obrázku je jasné, že vzniká moment  $M_{f_K}$ , ten působí proti otáčení kola. Z obrázku 31 tak vyplývá, že lze posunout reakci  $Z_K$  na svislou osu kola. [2]

Obrázek 31 - Zavedení momentu  $M_{f_K}$  působící proti otáčení kola [2]

Z obrázku 31 pak vyplývá, že moment  $M_{f_K}$  vyvolá vodorovnou reakci  $O_{f_K}$ , která působí proti směru pohybu kola. K udržení rovnováhy sil musí ve středu kola působit vodorovná síla  $F_{xK}$ . Zde platí rovnost  $F_{xK} = O_{f_K}$  (5). Tímto vzniká silová dvojice viditelná na obrázku 32. Síla  $O_{f_K}$  znázorňuje valivý odpor. [2]

Z obrázku 32 poté vyplývá, že

$$M_{f_K} = O_{f_K} * r_k = Z_K * e \quad (6)$$

Poté se pak dá z obrázku 32 vyjádřit valivý odpor kola vztahem

$$O_{f_K} = Z_K * \frac{e}{r_k} = Z_K * f_k \quad (7)$$

kde  $f_k$  - je součinitel valivého odporu kola

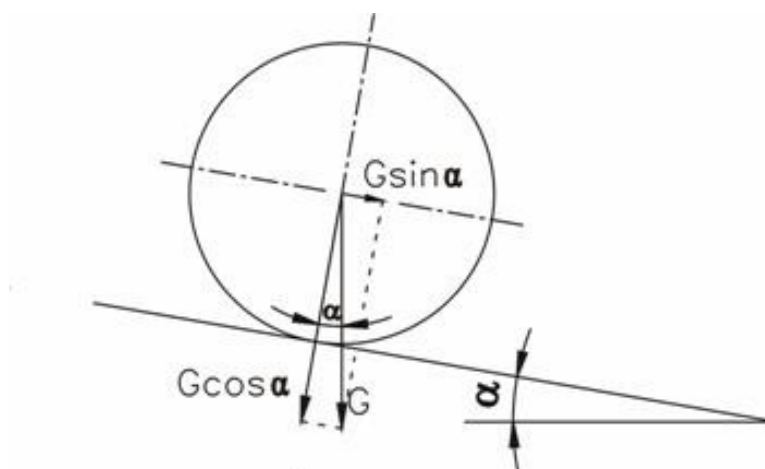
Pro asfalt a beton se součinitel valivého odporu pohybuje okolo 0,05. Jedná se o bezrozměrnou veličinu.

### 8.2.1.2 Vzdušný odpor

Při jízdě působí na vozidla vzdušný odpor, ten závisí také na tvaru automobilu a je tudíž nemožné ho přesně zjistit, pokud nevíme, o jaké vozidlo přesně se jedná. Pokud budeme uvažovat působení pouze na kolo lze vzdušný odpor vzhledem k aerodynamickému tvaru zanedbat. [2]

### 8.2.1.3 Odpor stoupání

Odpor stoupání je stanoven složkou tíhové síly působící na kolo ve směru rovnoběžném s rovinou nakloněnou o úhel  $\alpha$  jak je znázorněno na obrázku 32. [2]



Obrázek 32 - Stanovení odporu stoupání [2]

Lze tedy napsat, že:

$$O_s = G \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

kde  $G$  - je celková tíha působící na kolo

$\alpha$  - je úhel sklonu

### 8.2.1.4 Odpor proti zrychlení

Při rozjezdu a zrychlení vozidla začne proti směru zrychlení působit setrvačná síla, odpor zrychlení. [2]

Odpor zrychlení je určen vztahem:

$$O_z = \left( m + \sum_i \frac{J_{Ki}}{r_{di} r_{ki}} \right) a = O_{z_p} + O_{z_r} \quad (9)$$

ten je pak složen z odporu zrychlení posuvné částí o hmotnosti  $m$ :

$$O_{z_p} = m \cdot a \quad (10)$$

a z odporu zrychlení rotujících částí:

$$O_{z_r} = \sum_i \frac{J_{Ki}}{r_{di} r_{ki}} \cdot a \quad (11)$$

$$O_Z = m \cdot a + \frac{J \cdot a}{r_k^2} \quad (12)$$

kde  $m$  - je celková hmotnost soustavy  
 $a$  - zrychlení soustavy  
 $J$  - je setrvačnost rotujících hmot  
 $r$  - je poloměr kola

### 8.2.1.5 Potřebná hnací síla

Pro pohyb kola je potřeba překonat všechny jízdní odpory, které při jízdě působí. Po dosazení vztahů (7), (8) a (12) do vztahu (13) pak dostaneme vztah pro potřebnou hnací sílu nutnou k uvedení do pohybu. [2]

$$F_H = n \cdot Z_K \cdot f_k + G \cdot \sin \alpha + m \cdot a + \frac{J \cdot a}{r_k^2} \quad (13)$$

kde  $n$  - je počet poháněných kol (v tomto případě je už vše počítáno pouze na jedno kolo, hmotnost už je mezi jednotlivá kola rozdělena)

Při předpokladu, že je reakce  $Z_K$  rovna celkovému zatížení kola  $G$  a rovina je nakloněna pod úhlem  $\alpha$ , pak platí tento vztah. [2]

$$Z_K = G \quad (14)$$

$$G = m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (15)$$

kde  $m$  - je celková hmotnost působící na jedno kolo  
 $g$  - jedná se o tíhové zrychlení  
 $\alpha$  - je úhel naklonění roviny

Poté můžeme pomocí stavu (13), (14) s (15) napsat, že:

$$F_H = m \cdot g \cdot f_k + m \cdot g \cdot \sin \alpha + m \cdot a + \frac{J \cdot a}{r_k^2} \quad (16)$$

Pro další výpočty je vyjádřena hmotnost  $m$  (17):

$$m = \frac{F_H - \frac{J \cdot a}{r_k^2}}{a + g \cdot \sin \alpha + f_k \cdot g}$$

A dále je také vyjádřeno zrychlení  $a$  (18):

$$a = \frac{F_H - m \cdot g \cdot f_k - m \cdot g \cdot \sin \alpha}{m + \frac{J}{r_k^2}}$$

### 8.3 Pohon pro použití automobil

V této kapitole je zjišťováno, zdali je pohon vhodný pro umístění do automobilu (elektromobilu) o hmotnosti 1200 kg, s pohonem na všechna 4 kola a tudíž rozložením hmotnosti na jednotlivá kola 300 kg. Jedná se o automobil určený do města.

#### 8.3.1 Zrychlení vozidla

Elektromobil určený do města má maximální uvažovanou rychlost 100 km/h a zrychlení na tuto rychlost je podobné jiným automobilům a má hodnotu 10s.

$$a_{vmax} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(0-100)/3,6}{(0-10)} = \underline{\underline{2,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}} \quad (19)$$

kde  $a_{vmax}$  - je maximální zrychlení vozíku

$\Delta v$  - je změna rychlosti

$\Delta t$  - je změna času

#### Zadané hodnoty:

$$m = 300 \text{ kg} \quad a_{vmax} = 2,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad v_{max} = 27,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$f_k = 0,05 \quad J = 0,254 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\alpha = 0^\circ \quad r_K = 0,225 \text{ m}$$

#### 8.3.2 Potřebná hnací síla:

Potřebnou hnací sílu zjistíme pomocí dosazení zadaných hodnot do rovnice (16).

$$\underline{\underline{F_H = 979,3 \text{ N}}}$$

#### 8.3.3 Potřebný krouticí moment

$$M_K = F_H \cdot r_K \quad (20)$$

$$\underline{\underline{M_K = 220,3 \text{ N} \cdot \text{m}}}$$

#### 8.3.4 Potřebný výkon elektromotoru

Je výkon elektromotoru potřebný při rychlosti 100 km/h.

$$P = F_H \cdot v_{max} \quad (21)$$

$$\underline{\underline{P = 27\,195 \text{ W}}}$$



Z vypočítaných parametrů vyplývá, že pro pohon v městském elektromobilu je nutné použít variantu pohonu C, s výkonem 40,5 kW, krouticím momentem až 305,7 Nm a napájecím napětím 300 V.

### 8.3.5 Maximální hodnoty při použití pohonu Megaflux MF021050 typ C

#### Zadané hodnoty:

$$m = 300 \text{ kg} \quad M_K = 305,7 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$P = 40,5 \text{ kW} \quad J = 0,254 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$f_k = 0,05 \quad r_K = 0,225 \text{ m}$$

#### 8.3.5.1 Maximální hnací síla

Ze vztahu (19) vyjádříme hnací sílu  $F_H$  a pak do rovnice dosadíme.

$$F_H = \frac{M_K}{r_K} \quad (22)$$

$$\underline{\underline{F_H = 1358,6 \text{ N}}}$$

#### 8.3.5.2 Maximální možné zrychlení pohonu

Po dosazení do vztahu (18) vyjde maximální zrychlení pohonu.

$$\underline{\underline{a = 3,97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}}$$

#### 8.3.5.3 Maximální rychlost pohonu

Vyjádřením rychlosti  $v_{max}$  ze vztahu (21) dostaneme maximální rychlost pohonu.

$$v_{max} = \frac{P}{F_H} \quad (23)$$

$$\underline{\underline{v_{max} = 29,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

To je maximální rychlost 107,3 km/h.

#### 8.3.5.4 Čas potřebný ke zrychlení na maximální rychlost při maximálním zrychlení

Potřebný vztah vyjádříme z rovnice (19).

$$t = \frac{v_{max}}{a} \quad (24)$$

$$\underline{\underline{t = 7,51 \text{ s}}}$$

### 8.3.6 Uvažované hodnoty vhodné pro automobil

Výše jsou uvedeny maximální možné hodnoty rychlosti a zrychlení, kterých jde s použitým pohonem dosáhnout. Pro reálné použití v městském elektromobilu jsou takové hodnoty zbytečné, proto je možné uvažovat o zrychlení  $2,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , což je zrychlení na 100 km/h za 10s.

#### 8.3.6.1 Maximální sklon terénu

Určuje, jaký maximální sklon terénu dokáže automobil při zrychlení  $2,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  vyjet. To zjistíme tak, že si ze vzorce (16) vyjádříme  $\alpha$  (25).

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{F_H}{m \cdot g} - \frac{a \cdot \left(m + \frac{J}{r_K^2}\right)}{m \cdot g} - f_k$$

$$\underline{\underline{\alpha = 7,4^\circ}}$$

To znamená, že při zrychlení  $2,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  automobil vyjede kopec se sklonem  $7,4^\circ$ . To znamená, že na délku silnice 1000 m vystoupá o 128 výškových metrů, to je stoupání 12,8%, které už je na běžné silnici vysoká hodnota. Z toho důvodu, lze usoudit, že pohon je vhodný i do městského elektromobilu. Při vyšším sklonu terénu není možné dosáhnout maximálního zrychlení.

### 8.4 Pohon pro použití v 900 kg, šestikolovém robotu

Zde je zjištěno, jaký typ pohonu je vhodný pro šestikolový robot s hmotností 900 kg, při rozložení hmotnosti na všechny kola. Jaké jsou vhodné parametry rychlosti a zrychlení robotu a také jaký sklon terénu robot vyjede.

#### 8.4.1 Zrychlení robotu

Takto těžký a velký robot, ponese mnoho vybavení pro průzkum a monitoring terénu. Je předpoklad, že maximální rychlost pro přesuny v terénu bude 25 km/h při zrychlení na tuto rychlost po 5s. Terén, ve kterém se robot bude pohybovat, je převážně kamenitý, šotolina, travnatý terén. Z toho vyplývá součinitel valivého odporu  $f_k = 0,15$

$$a_{vmax} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(0-25)/3,6}{(0-5)} = \underline{\underline{1,39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}} \quad (19)$$

**Zadané hodnoty:**

$$\begin{aligned}m &= 150 \text{ kg} & a_{vmax} &= 1,39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \\g &= 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} & v_{max} &= 6,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\f_k &= 0,15 & J &= 0,254 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\\alpha &= 0^\circ & r_K &= 0,225 \text{ m}\end{aligned}$$

**8.4.2 Potřebná hnací síla:**

Potřebnou hnací sílu zjistíme pomocí dosazení zadaných hodnot do rovnice (16).

$$\underline{\underline{F_H = 430,4 \text{ N}}}$$

**8.4.3 Potřebný krouticí moment**

$$M_K = F_H \cdot r_K \tag{20}$$

$$\underline{\underline{M_K = 96,8 \text{ N} \cdot \text{m}}}$$

**8.4.4 Potřebný výkon elektromotoru**

Je výkon elektromotoru potřebný při maximální rychlosti 25 km/h.

$$P = F_H \cdot v_{max} \tag{21}$$

$$\underline{\underline{P = 2\,989 \text{ W}}}$$

Z vypočítaných parametrů vyplývá, že pro pohon robotu je možné použít jakoukoliv z variant A, B nebo C, záleží na napájecím napětí robotu, kapacitě baterie, atd. Pro další výpočet tedy zvolím variantu B, která je pro takto velký robot vhodná.

**8.4.5 Maximální hodnoty při použití pohonu Megaflux MF021050 typ B****Zadané hodnoty:**

$$\begin{aligned}m &= 150 \text{ kg} & M_K &= 305,7 \text{ N} \cdot \text{m} \\P &= 23,9 \text{ kW} & J &= 0,254 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\f_k &= 0,15 & r_K &= 0,225 \text{ m} \\v_{max} &= 6,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}\end{aligned}$$

**8.4.5.1 Maximální hnací síla**

Dosazením do (17) vyjde.

$$\underline{\underline{F_H = 1358,6 \text{ N}}}$$

### 8.4.5.2 Maximální možné zrychlení pohonu

Dosazením do (18) vyjde.

$$\underline{\underline{a = 7,34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}}$$

### 8.4.5.3 Čas potřebný ke zrychlení na maximální rychlost při maximálním zrychlení

Dosazením do (24) vyjde.

$$\underline{\underline{t = 0,95 \text{ s}}}$$

### 8.4.6 Uvažované hodnoty vhodné pro automobil

Hodnota maximálního zrychlení a čas potřebný ke zrychlení na maximální rychlost, je pro robot zbytečná. Proto jsou maximální hodnoty omezeny na rychlost 25 km/h a zrychlení  $a_{vmax} = 1,39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  při přejezdech. V reálu se robot bude pravděpodobně pohybovat pomaleji.

#### 8.4.6.1 Maximální sklon terénu

Určuje, jaký maximální sklon terénu dokáže robot při zrychlení  $1,39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  vyjet. Dosazením do (25) vyjde.

$$\underline{\underline{\alpha = 39,1^\circ}}$$

To znamená, že při zrychlení  $1,39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  robot vyjede kopec se sklonem  $39,1^\circ$ . Při nižším zrychlení je robot schopen vyjet i prudší kopec. Při zrychlení  $0,65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  dokáže robot vyjet kopec se sklonem  $45^\circ$ . Při vyšším sklonu je možnost převrácení robotu, z toho důvodu, je v praxi nutné pomocí výpočtů ověřit, zdali se nepřevrátí.

## 8.5 Pohon pro použití v 300 kg, čtyřkolovém, robotu

Zde je zjištěno, jaký typ pohonu je vhodný pro čtyřkolový robot s hmotností 300 kg a tedy rozložení hmotnosti 75 kg na jednotlivá kola.

### 8.5.1 Zrychlení robotu

V případě čtyřkolového robotu o hmotnosti 300 kg by se pravděpodobně jednalo o rychlejšího robota, s maximální rychlostí okolo 60 km/h s vysokým zrychlením na tuto rychlost za dobu 5 s. jezdící po zpevněném povrchu nebo polní cestě, pak by byl  $f_k = 0,1$

$$a_{vmax} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(0-60)/3,6}{(0-5)} = \underline{\underline{3,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}} \quad (19)$$

**Zadané hodnoty:**

$$\begin{aligned}
 m &= 75 \text{ kg} & a_{vmax} &= 3,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \\
 g &= 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} & v_{max} &= 16,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\
 f_k &= 0,1 & J &= 0,254 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\
 \alpha &= 0^\circ & r_K &= 0,225 \text{ m}
 \end{aligned}$$

**8.5.2 Potřebná hnací síla:**

Potřebnou hnací sílu zjistíme pomocí dosazení zadaných hodnot do rovnice (16).

$$\underline{\underline{F_H = 324,5 \text{ N}}}$$

**8.5.3 Potřebný krouticí moment**

$$M_K = F_H \cdot r_K \quad (20)$$

$$\underline{\underline{M_K = 73 \text{ N} \cdot \text{m}}}$$

**8.5.4 Potřebný výkon elektromotoru**

Je výkon elektromotoru potřebný při maximální rychlosti 25 km/h.

$$P = F_H \cdot v_{max} \quad (21)$$

$$\underline{\underline{P = 5\,409 \text{ W}}}$$

Z vypočítaných parametrů vyplývá, že pro pohon robotu je možné použít jakoukoliv z variant A, B nebo C, záleží na napájecím napětí robotu, kapacitě baterie, atd. Z předběžných výpočtů vyplývá, že pohon je dostatečně výkonný pro takovýto robot. Ovšem vzhledem k váze robotu 300 kg a z toho hmotnost pohonů 114,8 kg, zůstává užitečné zatížení pouze 185, 2 kg. Z toho důvodu je pro robot vhodné použít méně výkonný a lehčí pohon. Výpočet proto není dále proveden.

**8.6 Kontrola spojky**

Je potřeba zkontrolovat, zda li je spojka schopna přenést maximální krouticí moment z elektromotoru na kolo. Z programu PTC Creo je známa styčná plocha mezi sklíčidlem a ocelovým diskem, je rovna  $S_{Sk} = 57,2948 \text{ cm}^2$ . Z důvodu malých nepřesností a drsnosti povrchu, který zhoršuje kvalitu spojení pomocí magnetizmu je plocha zaokrouhlena na  $S_{Sk} = 57 \text{ cm}^2$ . Sklíčidlo vyvine upínací sílu  $F_{Sk} = 180 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

Pak tedy můžeme napsat.

$$F_U = S_{Sk} \cdot F_{Sk} \quad (26)$$

$$\underline{\underline{F_U = 10\,260\,N}}$$

Přepočtení síly z kolmého na tečný směr je zde podobné jako v případě smykového tření, kde místo normálové síly  $F_N$  určující tíhu tělesa, zavedeme upínací sílu  $F_U$  pak se tedy  $F_U = F_N$ . Místo součinitele smykového tření, zde uvedeme součinitel účinnosti, ten je zde z důvodu možných ztrát při přenášení síly. Součinitel účinnosti pak je  $f_U = 0,98$ . Z tohoto získáme místo třecí síly, sílu upínací tečnou  $F_{Ut}$ .

$$F_{Ut} = F_U \cdot f_U \quad (27)$$

$$\underline{\underline{F_{Ut} = 10\,054,8\,N}}$$

Pro zjištění jak velký krouticí moment spojka přenese, vynásobíme tečnou upínací sílu poloměrem ocelového kotouče, ten je 45 mm. Pak dostaneme vztah.

$$M_S = F_{Ut} \cdot r_{Ok} \quad (28)$$

$$\underline{\underline{M_S = 452,5\,Nm}}$$

Spojka dokáže přenést krouticí moment 452,5 Nm. Což je více než maximální moment motoru 305,7 Nm a spojka tedy vyhovuje.

## 8.7 Výpočet parametrů kotoučové brzdy

V pohonu je použita kotoučová brzda vlastní konstrukce. Ta se používá pro zablokování kola na rovině. Princip výpočtu je opět obdobný jako u kontroly spojky a tudíž se počítá se smykovým třením. Přítlačnou sílu zde vyvozují pružiny a je  $F_U = 300\,N$ . Součinitel smykového tření je mezi ocelí a brzdovými špalky je  $f = 0,7$ . Pak dosazením do vztahu (27) vyjde. [5]

$$\underline{\underline{F_{Ut} = 210\,N}}$$

Tato síla působí na poloměru brzdového kotouče  $r_{Kb} = 85\,mm$ . Dosazením do vztahu (28) vyjde krouticí moment, který brzda ubrzdí.

$$\underline{\underline{M_B = 17,85\,Nm}}$$

Kotoučová brzda dokáže přenést maximální krouticí moment 17,85 Nm, což zdaleka nestačí na zabrzdění pohonu kola, z toho důvodu je vhodná pouze pro zabrzdění pohonu na rovině nebo v mírném kopci.

## 8.8 Kontrola drážkování

Příruba kola přenáší krouticí moment od kola na kotoučovou brzdou, přes dvě drážkování. Pro kontrolu stačí vypočítat menší z těchto drážkování. Pro výpočet potřebujeme vědět, že

$$\tau_K = \frac{M_k}{W_k} \leq \tau_{DK}$$

$$\tau_K = \frac{M_k}{\frac{\pi \cdot d^3}{16}} \leq \tau_{DK} \quad (30)$$

Ze vzorce (30) lze vyjádřit potřebný průměr, když známe krouticí moment a napětí v krutu dovolené. Zde  $M_k = M_B$  a  $\tau_{DK} = 60 \text{ MPa}$ . [5]

$$d' = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_B}{\pi \cdot \tau_{DK}}} \quad (31)$$

$$d' = 11,48$$

Minimální tloušťka hřídele je 11,48 mm, je zvoleno rovnoboké drážkování 6x13x16 mm. Dále je potřeba vypočítat délku drážky, známe moment a  $p_D = 75 \text{ MPa}$ . [5]

$$p = \frac{F}{S} = \frac{4 \cdot M_k}{6 \cdot d \cdot h \cdot l} \leq p_D \quad (32)$$

$$l' = \frac{4 \cdot M_B}{6 \cdot 13 \cdot 1,5 \cdot 75}$$

$$l' = 8,14 \text{ mm}$$

Minimální délka drážkování je 8,14 mm, volím délku drážkování  $l = 13 \text{ mm}$ .

## 8.9 Kontrola ložiska

O bezproblémové otáčení a přenášení sil se starají ložiska se zkříženými válečky, kdy jsou použity ložiska ve dvou párech, vnitřní pár slouží pouze k otáčení kola bez pohánění pohonem a působí na ně prakticky pouze zatížení od hmotnosti. Vnější pár ložisek přenáší kromě radiálních také axiální síly působící při zatáčení, odstředivá síla. Bude tedy zkontrolován horší případ a méně únosné, menší ložisko. Pro provedení výpočtu je nejprve potřeba znát zatížení ložiska. Radiální zatížení ložisek vzniká od reakcí na hmotnost působící na pohon, počítáno pro případ zatížení šestikolového robotu a tedy 150 kg působících na pohon. Axiální síla vzniká při zatáčení robotu, jedná se o odstředivou sílu.

### 8.9.1 Výpočet radiálních sil působících na ložiska

Z obrázku 33 je patrné, že zde působí síla  $F_1$ , ta vzniká od hmotnosti robotu. Pak sílu  $F_1$  můžeme napsat.

$$F_1 = m \cdot g \quad (33)$$

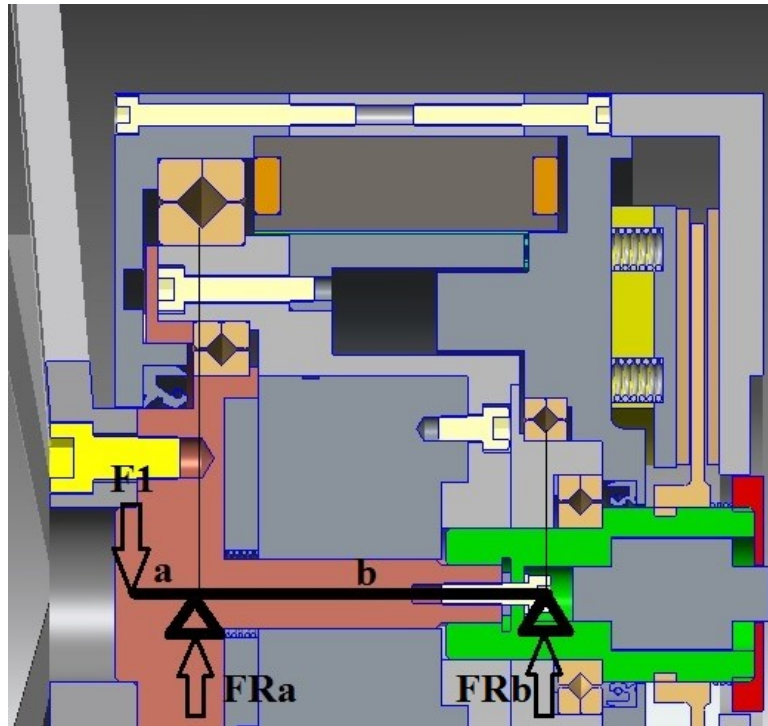
$$\underline{\underline{F_1 = 1472 \text{ Nm}}}$$

Poté z rovnováhy sil a rovnováhy moment vyjdřřme reakce FRa, FRb.

$$\underline{\underline{FR_a = -197 \text{ N}}}$$

$$\underline{\underline{FR_b = 1669 \text{ N}}}$$

Pro výpočet se pořt s vtřř silou



Obrázek 33 - Zobrazen radiálních sil působících na lořisko

### 8.9.2 Výpočet axiálních sil působících na lořisko

Axiální síla působící na lořisko vychází ze síly odstřediv. Maximální rychlost robotu je uvedena 25 km/h. Při velikosti a hmotnosti robotu lze při maximální rychlosti pořtat s poloměrem zatcen okolo 10 m.

$$F_o = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (34)$$

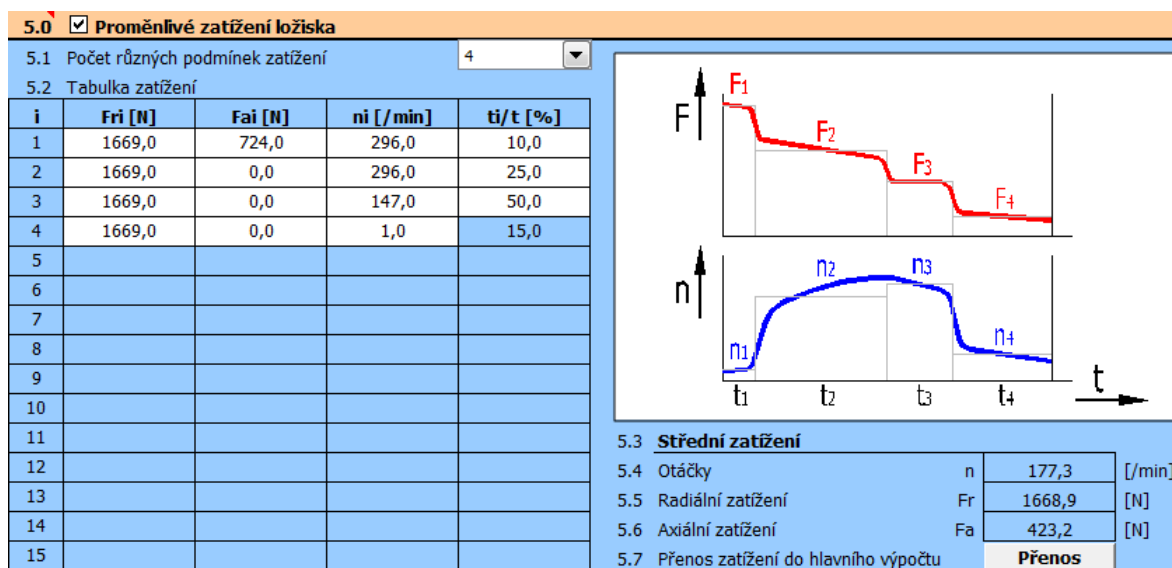
$$\underline{\underline{F_o = 724 \text{ N}}}$$

### 8.9.3 Výpočet zaten lořiska

Lořisko je namáháno promnlivm zatenm. Do programu MITCalc jsou zadány parametry. Jsou to radiální a axiln síly při různých rychlostech, je zde v procentech



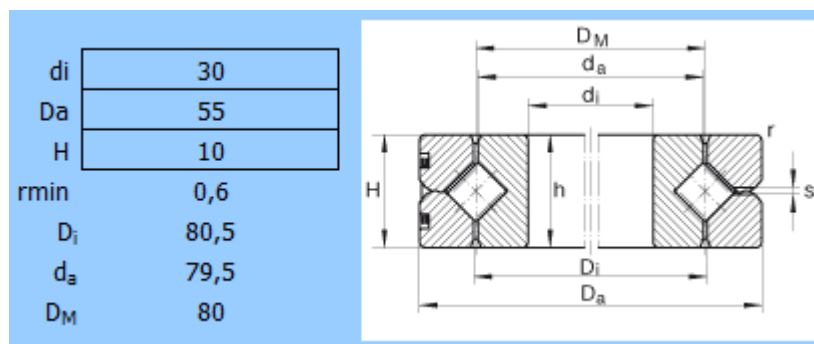
zadáno, jak často bude které zatížení působit. Z proměnlivého zatížení je zjištěno střední zatížení, se kterým se počítá.



Obrázek 34 - Zadání proměnlivého zatížení ložiska

#### 8.9.4 Rozměry ložiska

V programu MITCalc je vybráno ložisko, na obrázku jsou vidět jeho rozměry.



Obrázek 35 - Rozměry použitého ložiska

#### 8.9.5 Požadované parametry ložiska

Ložisko musí vydržet nepřetržitý provoz 10 000 hodin. To je 417 dní bez přestávky.

<b>1.12 Požadované parametry ložiska</b>		
1.13 Trvanlivost ložiska	Lh	10000 [h]
1.14 Součinitel statické bezpečnosti	s0	2,00

Obrázek 36 - Požadované parametry ložiska

### 8.9.6 Parametry ložiska a výpočet modifikované trvanlivosti

Zde jsou parametry ložiska, níže pak výpočet modifikované trvanlivosti. Požadovaná doba provozu je 10 000 h, základní trvanlivost tohoto ložiska pak je 50 468 h, modifikovaná trvanlivost je 14 636 h, to je více, než je požadovaná trvanlivost a tudíž ložisko vyhovuje.

2.2 Parametry ložiska			
2.3	Základní dynamická únosnost	C	11000 [N]
2.4	Dynamické ekvivalentní zatížení	P	1668,9 [N]
2.5	Základní trvanlivost	L10h	50468 [h]
2.6	Základní statická únosnost	C0	15000 [N]
2.7	Statické ekvivalentní zatížení	P0	1668,9 [N]
2.8	Součinitel statické bezpečnosti	s0	8,99
2.9	Dovolené radiální zatížení	Frmax	- [N]
2.10	Dovolené axiální zatížení	Famax	- [N]
2.11	Referenční otáčky	nr	10000 [/min]
2.12	Mezní otáčky	nmax	12000 [/min]
2.13	Ztrátový výkon	NR	0,84 [W]
2.14	Váha ložiska	g	0,17 [kg]

Obrázek 37 - Parametry ložiska

3.7 Výpočet modifikované trvanlivosti			
3.8	Mezní únavové zatížení	Pu	4550 [N]
3.9	Požadovaná spolehlivost	90%	
3.10	Znečištění maziva	Normální čistota	
3.11	Součinitel úrovně znečištění	η	0,6 - 0,5 0,60
3.12	Součinitel trvanlivosti	a1/a23	1 0,29
3.13	Modifikovaná trvanlivost	Lmh	14636 [h]

Obrázek 38 - Výpočet modifikované trvanlivosti ložiska

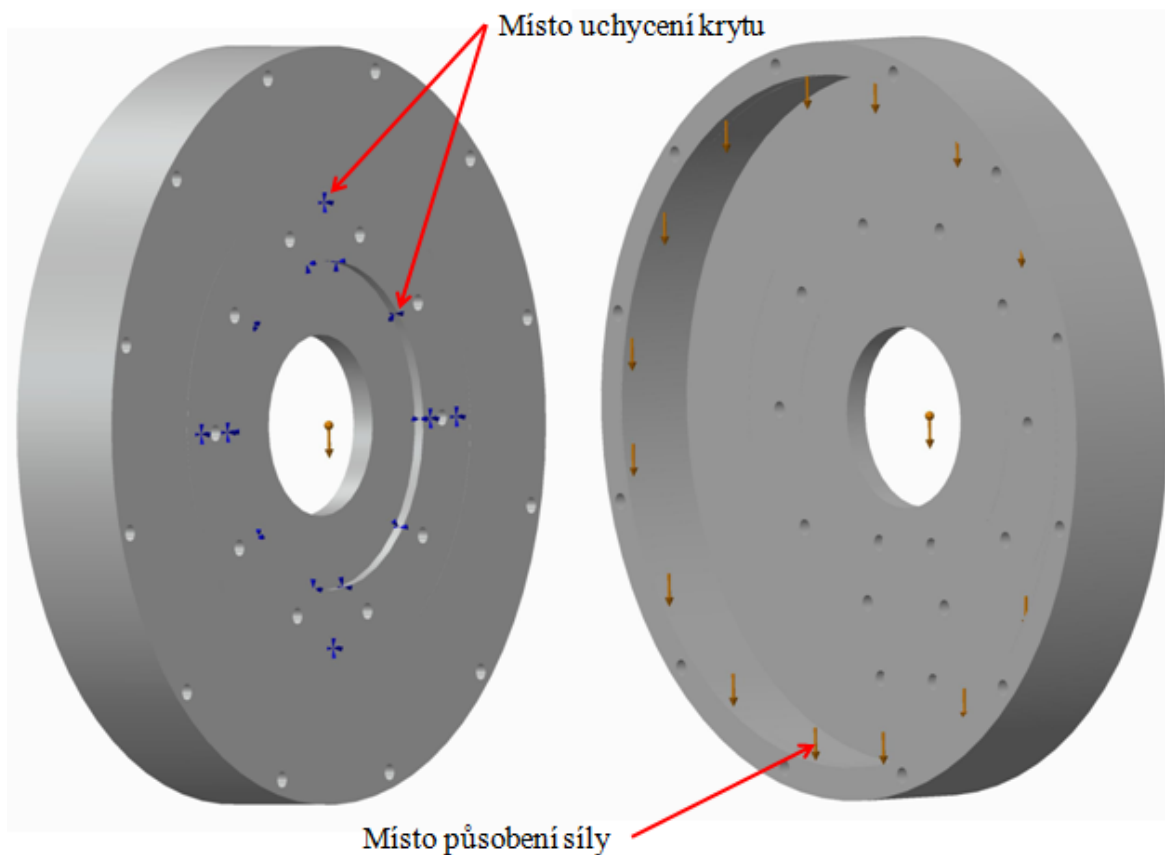
### 8.10 Deformační analýza krytu brzdy

Kryt brzdy je hlavním nosným prvkem celého pohonu, přes který je pohon upevněn k robotu, a který musí přenášet veškeré namáhání a rázy vznikající při jízdě robotu. Tento kryt prakticky drží celou váhu robotu, je zde počítáno s variantou kdy musí unést 150 kg. Při jízdě vzniká mnoho rázů vlivem špatného povrchu, po kterém vozidlo jede. Z toho důvodu je stanoven bezpečnostní koeficient  $k = 10$ . A proto je počítáno s 10 násobným přetížením. Materiálem je superdural 42 4203 ( $R_e = 305 \text{ MPa}$ ). [5]

$$F = m \cdot g \cdot k$$

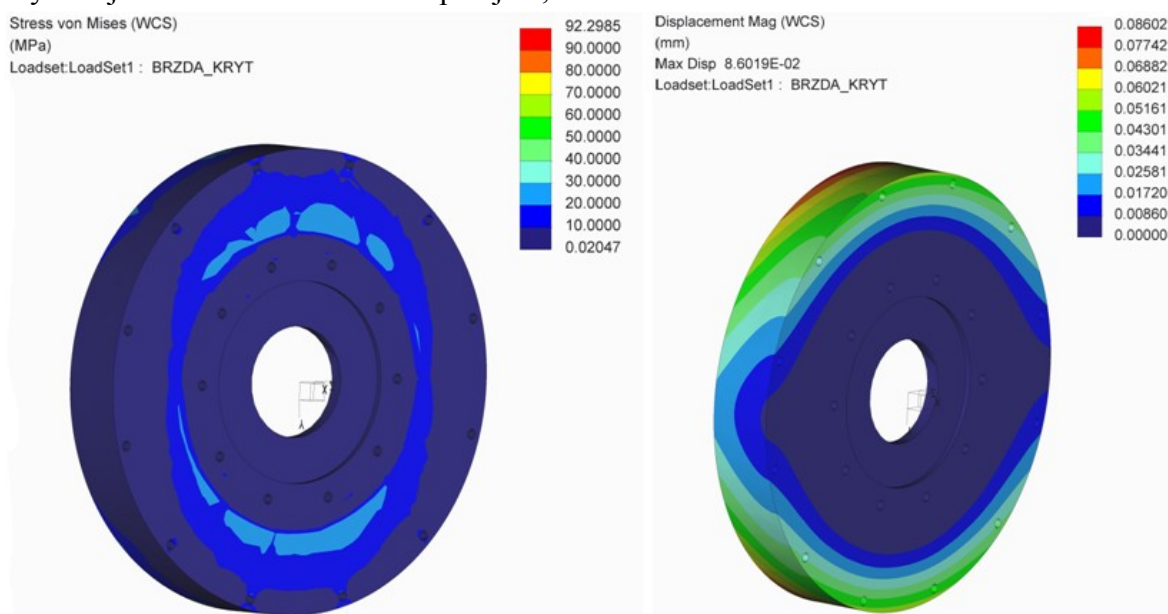
$$\underline{\underline{F = 14\,715 \text{ N}}}$$

Kryt je uchycen za osazení a plochu, na které bude působit tření v důsledku přitažení šroubů. Síla působí na kryt přes osazení z druhé strany.



Obrázek 39 – Uchycení plechu a působící síly

Na obrázku 40 lze vidět vlevo napěťovou a vpravo deformační analýzu. Maximální napětí při rázu je 92,3 MPa, což je méně než dovolených 305 MPa, součást napěťově vyhovuje. Maximální deformace pak je 0,086 mm.



Obrázek 40 - Napěťová a deformační analýza

## 9 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout integrovaný pohon kola pro vícekolový podvozek s funkcí umožňující odpojení pohonu od kola při jeho poruše. Obsah práce odpovídá zadání diplomové práce.

Na začátku práce je provedena analýza různých stávajících koncepcí pohonů používaných u vozidel. Dále je proveden průzkum mezi současnými výrobci pohonů umístěných v kolech, je provedena jednoduchá charakteristika. Jsou popsány jimi využívané koncepce pohonů a analyzovány jejich výkonové parametry.

Další kapitola se zabývá požadavky pro konstrukci vlastního pohonu umístěného v kole. Jsou zde využity poznatky z průzkumu mezi současnými výrobci. Je proveden popis komponent nutných k fungování pohonu, popis vhodných elektromotorů. A také popis možných principů odpojení pohonu od kola a zabrzdění kola.

Byly navrženy tři rozdílné koncepční varianty pohonu v náboji kola. Varianty jsou A, B a C. Každá z variant je poté důkladněji popsána, důraz je kladen na rozdíly mezi variantami, na jejich přednosti a nedostatky.

Po popisu variant řešení, následuje výběr optimální varianty. Ten je proveden pomocí hodnotové analýzy, u které jsou stanoveny jednotlivé kritéria, jejich hodnoty a charakteristika. Hodnocení probíhá pomocí porovnání těchto kritérií metodou trojúhelníku párů. Po sečtení všech vážených indexů se došlo k závěru, že optimální variantou pro další zpracování je varianta C.

V kapitole zabývající se optimální variantou je podrobněji popsáno kompletní konstrukční řešení. Jsou popsány všechny použité komponenty, s detailním vysvětlením jejich principu a funkce. Je popsána nosná konstrukce pohonu, dále je popsán montážní postup a řešení potřebná pro bezpečné a bezproblémové fungování pohonu. Poté jsou napsány možnosti, kterými by se bylo potřeba dále zabývat při výrobě a zkoušení pohonu.

Nakonec je proveden výpočet určitých částí pohonu. Jsou vypočítány maximální parametry zrychlení, rychlosti, atd., kterých je pohon schopen dosáhnout. Je proveden výpočet a parametry brzdy. Dále také spojky, zdali dokáže přenést potřebný moment na kolo. Jsou zkontrolovány některé funkční součásti, zdali vyhovují pro provoz pohonu.

Tento pohon integrovaný do kola robotu by se mohl uplatnit pro reálné použití. Bylo by potřeba sestavit funkční prototyp, na kterém by se zjistilo, zdali v praxi vše funguje, tak jak je zamýšleno. Bylo by potřeba připojit a naprogramovat řídicí jednotku ovládající tento pohon a celý pohon důkladně otestovat v reálných podmínkách.

## 10 Seznam použité literatury

- [1] SIEGWART, R. *Introduction to autonomous mobile robots*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2004, 321 s. ISBN 02-621-9502-X. Dostupné z: [http://www.ee.ui.ac.id/muis/course\\_file/robotics/Introduction\\_to\\_Autonomous\\_Mobile\\_Robots.pdf](http://www.ee.ui.ac.id/muis/course_file/robotics/Introduction_to_Autonomous_Mobile_Robots.pdf)
- [2] KÁRNÍK, Ladislav. *Servisní roboty* [online]. 2007 [cit. 2011-04-27]. MODELOVÁNÍ A ANALÝZA SERVISNÍCH ROBOTŮ. Dostupné z WWW: <[http://robot2.vsb.cz/elekskripta/servisni\\_roboty/index.htm](http://robot2.vsb.cz/elekskripta/servisni_roboty/index.htm)>. ISBN 80-248-0626-6.
- [3] SKAŘUPA, J., MOSTÝN, V. *Teorie průmyslových robotů*. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2000. 146 s. ISBN 80-88922-35-6.
- [4] SKAŘUPA, J., MOSTÝN, V. *Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů*. 1. Vydání. Košice: Viena Košice, 2002. 190 s. ISBN 80-88922-55-0.
- [5] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky* : pomocná učebnice pro školy technického zaměření. Úvaly : Albra, 2003. 865 s. ISBN 80-86490-74-2.
- [6] SKAŘUPA, Jiří. *Metodika konstruování*. Ostrava : Vysoká škola báňská, 1993. 152 s. ISBN 80-7078-167-X.
- [7] Mazda CX-7. *Automobilrevue* [online]. 2009 [cit. 2013-01-16]. Dostupné z: [http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/novinky/mazda-cx-7\\_38901.html](http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/novinky/mazda-cx-7_38901.html)
- [8] Audi Q5 Hybrid quattro. *Motorimpress* [online]. [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://motorimpress.com/audi/audi-q5-hybrid-quattro-2011-version-details-photos-and-video.html>
- [9] Jak funguje hybridní pohon. *Auto Motory* [online]. 2008 [cit. 2013-01-16]. Dostupné z: <http://www.auto-motory.com/hybridni-pohon/>

- [10] Lohner-Porsche Mixte Voiturette. Ultimatecarpage [online]. 2007 [cit. 2013-01-20]. Dostupné z: <http://www.ultimatecarpage.com/car/3456/Lohner-Porsche-Mixte-Voiturette.html>
- [11] Rover - vozidlo pro měsíc. Mek.kosmo [online]. 2003 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: [http://mek.kosmo.cz/pil\\_lety/usa/apollo/ap-15/lk2.htm](http://mek.kosmo.cz/pil_lety/usa/apollo/ap-15/lk2.htm)
- [12] History of Hybrid Vehicles. Hybridcars.com [online]. 2011 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.hybridcars.com/history-of-hybrid-vehicles/>
- [13] LRV operations handbook. In: Lunar and Planetary Institute [online]. 1971 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: [http://www.lpi.usra.edu/lunar/documents/NTRS/collection2/NASA\\_TM\\_X\\_66816.pdf](http://www.lpi.usra.edu/lunar/documents/NTRS/collection2/NASA_TM_X_66816.pdf)
- [14] Lunar Rover. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2008 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Lunar\\_Rover](http://cs.wikipedia.org/wiki/Lunar_Rover)
- [15] Current Mission. NASA [online]. 2013 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://www.jpl.nasa.gov/missions/?type=current>
- [16] Mars Science Laboratory. NASA [online]. 2013 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://mars.jpl.nasa.gov/msl/>
- [17] The Volvo Recharge Concept. Gizmag.com [online]. 2007 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.gizmag.com/go/7975/>
- [18] Revoluční kolo od Michelinu. Hybrid.cz [online]. 2008 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/clanky/revolucni-kolo-od-michelinu-prevrat-pro-svet-elektromobilu>
- [19] Michelin Active Wheel. Oneelectriccars.com [online]. 2012 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.oneelectriccars.com/tag/michelin-active-wheel/>

- [20] Protean Electric. Proteanelectric.com [online]. 2013 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.proteanelectric.com/>
- [21] Elektrokola. Hybrid.cz [online]. 2010 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/clanky/elektrokola-dojezd-hmotnost-vykon-jine-medialni-fikce>
- [22] EC-flat motors. Maxonmotor.com [online]. 2013 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/ec-flat-motors>
- [23] Megaflux Frameless Torque Motors. Alliedmotion.com [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.alliedmotion.com/Products/Series.aspx?s=52>
- [24] Hřídelové spojky. Bmcbaltas.cz [online]. [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.bmcbaltas.cz/category/hridelove-spojky>
- [25] Dělení magnetických upínačů. Magneticportal.cz [online]. 2013 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.magneticportal.cz/magneticke-upinace/deleni-magnetickych-upinacu>
- [26] Elektromagneticky ovládané spojky a brzdy. Troma-mach.cz [online]. 2011 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.troma-mach.cz/Produkt/elektromagneticky-ovladane-spojky-a-brzdy.aspx>
- [27] Vývojové trendy magnetických upínačů. Cez.cz [online]. 2011 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/contle/vzdelavani/14-volny.pdf>
- [28] Elektrická trakce - Elektrodynamické brzdy [online]. 2008 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/ET/ET%20skripta%20Danzer/ETR800.pdf>
- [29] Vývojové trendy magnetických upínačů. Cez.cz [online]. 2010 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/14-volny.pdf>

## 11 Seznam příloh

Příloha A:	Seznam obrázků
Příloha B:	Seznam tabulek
Příloha C:	Kontrolní výpočet ložisek (MITCalc)
Příloha D:	Požadavkový list
Příloha E:	Katalogové listy
Příloha F:	Výkresová dokumentace

Příloha G:	CD-ROM Diplomová práce 2013
------------	-----------------------------

CD-ROM Obsahuje:

- Výkresovou dokumentaci v AutoCADu
- Modely navržených variant v CAD systému PTC Creo
- Model optimální varianty v CAD systému PTC Creo
- Přílohy diplomové práce
- Diplomová práce.pdf



## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Dr. Ing. Vladimíru Mostýnovi za odborné vedení práce. Za jeho vstřícnost a ochotu poskytovat mi typy, konzultace a odborné rady. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mi přispěli svými hodnotnými radami a vyjádřili mi podporu při psaní práce.

